

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 1 2025

Частина 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дехтяр Анатолій Соломонович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

Дичко Аліна Олегівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій та дизайну;

Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 7 від 20 лютого 2025 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»
zareєстровано відповідно до Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька,
французька, словацька, румунська, італійська.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: G1 Хімічні технології та інженерія; G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією); G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), F2 Інженерія програмного забезпечення; F6 Інформаційні системи і технології; F7 Комп'ютерна інженерія; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка; D3 Менеджмент; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J5 Морський та внутрішній водний транспорт; J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International
(Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2025

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО

Поліщук М.М., Ткач М.М.

МОДИФІКАЦІЯ СТОПИ КРОКУЮЧОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА.....	1

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Павленко В.Я.

УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ РОЗРОБКИ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ – НАДІЙНЕ ПІДГРУНТЯ ВИРОБНИЦТВА ЯКІСНОЇ ТА КОНКУРЕНТОЗДАТНОЇ ПРОДУКЦІЇ В СУЧАСНІЙ ОРГАНІЗАЦІЇ.....	9

Фомін О.В., Козинка О.С., Турпак С.М., Васильєва Л.О., Красулін О.С.

ПЕРСПЕКТИВНІ КОНЦЕПТИ КУЗОВІВ НАПІВВАГОНІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЗАХИСНИХ АНТИВІБРАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ.....	16

Шорнікова С.В.

ТЕХНІЧНИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ – ЗАПОРУКА ВИПУСКУ ВИСОКОЯКІСНОЇ ПРОДУКЦІЇ	22

ПРИЛАДИ

Доля Г.М., Романюк В.А., Стародубцев С.О.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛАЗЕРНОГО РЕТРОРЕФЛЕКТИВНОГО ДАТЧИКА РАННЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ЗАГОРЯНЬ В УМОВАХ ПЕРЕШКОД.....	29

Монченко О.В., Кучеренко В.Л., Тищенко Є.О., Марченко Н.Б., Чубко Л.С.

МОДЕРНІЗАЦІЯ РОБОТИ РЕТИНАЛЬНОГО ЗОРОВОГО ПРОТЕЗА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЯКІСНОГО ЗОБРАЖЕННЯ З ІМПЛАНТУ СІТКІВКИ.....	35

Осадчук О.В., Мартинюк В.В., Євсєєва М.В., Мартинюк Г.І.

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ (КУПРУМ, БІСМУТ)ВМІСНОГО В-ДИКЕТОНАТУ.....	44

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Валуйський С.В., Лисенко О.І., Гірук Д.О.

МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В МЕРЕЖАХ SDN НА ОСНОВІ OPENFLOW.....	51

Герашенко А.Ю., Лебедев Д.Ю.

ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ 802.11 ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	59

Єсич Д.В., Лебедев Д.Ю.

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГФЕРЕНЦІЙНИХ ЗАВАД У БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ НА БАЗІ СТАНДАРТІВ 80211 В РАМКАХ СИМУЛЯТОРА NS3.....	66

Міхненко Я.О.

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ В ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНИХ МЕРЕЖАХ.....	73

Сусли А.І., Біганич В.Ю., Шуста В.С., Євич М.Я., Шуста В.Ю.

ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ В СФЕРІ ОСВІТИ: ВІД ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ДО ОНЛАЙН РЕСУРСІВ.....	79

Тихонов М.В., Кононова І.В.

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ДВОСТОРОННІХ ОЦІНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ...	86

Шевцов К.О., Живков О.П.

МІКРОХВИЛЬОВІ МЕТАМАТЕРІАЛЬНІ СТРУКТУРИ НА БАЗІ SIW ХВИЛЬОВОДІВ ТА РЕЗОНАТОРІВ.....	91

ЕНЕРГЕТИКА

Абдулін М.З., Куник А.А.

ВПЛИВ ДОМІШОК ВОДНЮ НА РОБОТУ КОМБІНОВАНИХ СТРУМЕНЕВО-НИШЕВИХ МОДУЛІВ ПРИ СПАЛЮВАННІ ПРОПАН-БУТАНУ.....98

Боженко М.Ф.

МЕТОДИКА ВИБОРУ ПОВЕРХНЕВИХ УТИЛІЗАТОРІВ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ В КОТЕЛЬНЯХ.....107

Бошков Л.З, Волгушева Н.В., Гречановський А.П., Гаранін Є.В.

КОЕФІЦІЄНТИ ДИФУЗІЇ ТА ТЕРМОДИФУЗІЇ ВОЛОГИ В ЩІЛЬНОМУ ШАРІ ЦЕОЛІТУ 13Х.....114

Пантелєєва І.В.

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕГАЗОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ.....120

Риндюк Д.В., Беднарська І.С.

ВПЛИВ ПАРОВОГО СИТА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН РЕГУЛЮВАЛЬНОГО КЛАПАНА.....128

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Андріянова М.В., Приходько Д.М., Коваль Д.С., Ясногор М.В., Головенко В.О., Черваков О.В.

АНТИКОРОЗІЙНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....135

Букет О.І., Бутенко О.С.

ІНДУКТИВНА СКЛАДОВА ІМПЕДАНСУ ЯК МАРКЕР ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ СТАЛЕВИХ АНОДІВ В МІНЕРАЛЬНІЙ ОЛИВІ.....142

Дудка М.В., Воробйова В.І.

КВАНТОВО-ХІМІЧНА ОЦІНКА АНТИОКСИДАНТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОСНОВНИХ СПОЛУК ХМЕЛЮ (*HUMULUS LUPULUS*): ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ДІЇ.....148

Забалуєв А.С., Ущановський Д.Ю., Воробйова В.І., Васильєв Г.С., Лінючева О.В.

ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ, МЕХАНІЧНІ ТА КАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ.....155

Іванченко А.В., Сокол О.Д.

ОДЕРЖАННЯ ХІМІЧНО АКТИВОВАНИХ СОРБЕНТІВ ІЗ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ТА ЇХ ВИПРОБУВАННЯ ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ БАРВНИКІВ ЗІ СТІЧНИХ ВОД 164

Ivaniuta S.P., Ivanenko O.I., Plashykhin S.V., Abramova A.O.

EVALUATING THE RISKS TO UKRAINE'S INFRASTRUCTURE IN A WARTIME CONTEXT.....170

Коваль М.Г.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАРБУВАННЯ БАВОВНЯНИХ ТКАНИН ПРЯМИМИ БАРВНИКАМИ ІЗ ПОВТОРНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ОЧИЩЕНИХ СТІЧНИХ ВОД.....180

Майзеліс А.О.

КОНТАКТНЕ ВИТІСНЕННЯ МІДІ В ПІРОФОСФАТНО-СУЛЬФОСАЛІЦИЛАТНОМУ ЕЛЕКТРОЛІТІ МІДНЕННЯ.....189

Мельник Л.І., Свідерський В.А., Доній О.М.

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ.....197

Мітіна Н.Б., Мініна Ю.О.

ПЕРЕРОБКА ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ВЕРМИКУЛЬТИВУВАННЯМ.....205

Морозова О.М., Федоренко О.Ю., Геворкян Е.С.

ВИКОРИСТАННЯ СТАТИСТИКИ ВЕЙБУЛЛА В ОПИСІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....211

Мощенко А.С., Воробйова В.І.

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЛИБОКО ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ НА ОСНОВІ ХОЛІН ХЛОРИДУ.....217

Сгадов С.О.

АЛГОРИТМ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН СКЛАДУ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТВЕРДИХ ТІЛ
ПІД ВПЛИВОМ ГАЗОВОЇ ФАЗИ, АКТИВОВАНОЇ ЗОВНІШНІМ ДЖЕРЕЛОМ ЗБУДЖЕННЯ.....224

Фролова Л.А., Родін Д.О., Нікітін М.О.

ВПЛИВ СКЛАДУ ТА ПАРАМЕТРІВ СИНТЕЗУ НА КОЛЬОРОВІ І ФОТОКАТАЛІТИЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ FE-AL-SO ШПІНЕЛЬНИХ ПІГМЕНТІВ.....230

Шкода В.О., Кравченко О.В., Гуляєв В.М., Коваленко А.Л.

ДОСЛІДЖЕННЯ АДСОРБЦІЙНОГО УЛОВЛЮВАННЯ ПЛАТИНИ, ЩО ВТРАЧАЄТЬСЯ
ПІД ЧАС КОНТАКТНОГО ОКИСНЕННЯ АМОНІАКУ У ВИРОБНИЦТВІ
НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ.....237

ТРАНСПОРТ

Бойко С.М., Котов О.Б., Райда І.М., Лебідь Г.О., Бойко О.С., Дерябіна І.О.

ПЕРСПЕКТИВИ ОРГАНІЗАЦІЇ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛІВ
В АСПЕКТІ РЕНОВАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ АЕРОДРОМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....243

Вишневський Д.О., Вишневська О.Д.

СПЕЦИФІКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФЛОТУ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....249

Войченко Т.О., Тришин В.В., Рященко О.І., Лісовський С.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ СУДЕН
З НАПІВЗАНУРЮВАЛЬНИМИ ГВИНТАМИ 255

Герасименко І.М., Пронь С.В., Висоцька І.І., Соловйова О.О.

ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ
МОНІТОРИНГУ ЩОДО СТАНУ ЛІСОВИХ МАСИВІВ У ПОВОЄННИЙ ЧАС.....263

Гордєєв М.Г.

ПОТЕНЦІАЛ І ВИКЛИКИ АВТОМАТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ СУДНАМИ
НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....270

Ловська А.О., Мурад'ян А.О., Рукавішников П.В., Демидюков О.В.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ КРИШКИ ЛЮКА НАПІВВАГОНА,
НАВАНТАЖЕНОЇ ВІД ЗЙОМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ КРІПЛЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ 276

Окороков А.М., Бех П.В., Лашков О.В.

ОРГАНІЗАЦІЯ МІЖНАРОДНИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ З ВРАХУВАННЯМ
РИЗИКІВ.....283

**Петров Л.М., Кішянус І.В., Петрик Ю.М., Борисенко Т.М., Могилянець Т.М., Верпівський С.М.,
Малиновський О.А., Масліч Н.Я., Шелухін С.В., Нікішин В.А.**

ТЕОРІЯ Л.М. ПЕТРОВА З ДОДАТКАМИ Ю.М. ПЕТРИКА ДЛЯ КОЛІСНОГО РУШІЯ
З КІНЕМАТИЧНОЮ РОЗВ'ЯЗКОЮ 289

Подольян В.О.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІТ-РІШЕНЬ.....295

Прокудін Г.С., Мельников І.А., Поляк П.К.

ПРОГНОЗУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ
ЧЕРЕЗ МИТНИЙ КОРДОН УКРАЇНИ.....301

Решетков Д.М., Коскіна Ю.О.

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ – ВИМОГИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ.....308

Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В., Якіменко М.Л., Осадчук М.В., Свірський В.В.

ПРО РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВО ОБГРУНТОВАНИХ НОРМ ОСНАЩЕННЯ ПЕРЕНОСНИМИ
ВОГНЕГАСНИКАМИ КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....315

Сільванська Г.М.

СУЧАСНА КЛАСИФІКАЦІЯ ТА СТРУКТУРА ЗАСОБІВ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....323

Степанов О.В., Волобуєва Т.В., Жданов О.О.

ОПТИМАЛЬНА ПЕРІОДИЧНІСТЬ ЗАМІНИ АГРЕГАТІВ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ
ПРИ ДОСЯГНЕННІ ЗАДАНОГО НАПРАЦЮВАННЯ.....335

Степанов О.В., Кувшинов А.О. АДАПТИВНА СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ.....	342
Трофименко І.В., Войченко Т.О., Пліта Л.Л., Федунів В.М. РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЕВРИСТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ В ЗАДАЧАХ БАГАТОАГЕНТНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ.....	348
Урум Н.С., Маннапова О.В., Рященко О.І., Лісовський С.В. ПОРІВНЯННЯ ВИКИДІВ ЗГОРЯННЯ НОВІТНІХ СУДНОВИХ ПАЛИВ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ.....	355
Фомін О.В., Козинка О.С., Скок П.О., Черкашин О.П., Красулін О.С. ПЕРСПЕКТИВНІ КОНЦЕПТИ КУЗОВІВ НАПІВВАГОНІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ.....	364
Черненко П.В., Бондар Є.В., Круглов О.В. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО СТВОРЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОБОЧОГО МІСЦЯ ОБЛІКУ МАТЕРІАЛЬНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ РЕМОНТУ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ.....	370
Шапенко Є.М., Котова С.О., Білоног О.В., Ярошевський В.В. РОЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ У РОЗВИТКУ МІСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ В УМОВАХ КОНЦЕПЦІЇ SMART CITY.....	376
Шевченко А.П., Якусевич Ю.Г., Дорофєєва З.Я., Тришин В.В. ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ПІДГОТОВКИ МОРЯКІВ НА ТЛІ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ.....	382
Шпак Н.Г., Павловська Л.А., Коробкова О.М. ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МОРСЬКИМ ПОРТОМ: НОВІТНІ МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ.....	389
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	395

CONTENTS

MACHINE SCIENCE

Polishchuk M.M., Tkach M.M.

MODIFICATION OF THE FOOT OF A WALKING MOBILE ROBOT.....	1

INDUSTRIAL ENGINEERING

Pavlenko V.Ya.

MANAGEMENT OF THE DESIGN DOCUMENTATION DEVELOPMENT PROCESS – A RELIABLE FOUNDATION FOR THE PRODUCTION OF QUALITY AND COMPETITIVE PRODUCTS IN THE MODERN ORGANIZATION.....	9

Fomin O.V., Kozynka O.S., Turpak S.M., Vasilyeva L.O., Krasulin O.S.

THE PROSPECTIVE CONCEPTS OF BODY DESIGNS FOR GONDOLA CARS USING NEW MATERIALS AND PROTECTIVE ANTI-VIBRATION COATINGS.....	16

Shornikova S.V.

TECHNICAL CONTROL OF DESIGN DOCUMENTATION IS THE KEY TO THE PRODUCTION OF HIGH-QUALITY PRODUCTS	22

EQUIPMENT

Dolya G.M., Romaniuk V.A., Starodubtsev S.O.

EFFICIENCY OF RRS BASED LASER SENSOR FOR EARLY IGNITION DETECTION IN A NOISY ENVIRONMENT.....	29

Monchenko O.V., Kucherenko V.L., Tishchenko Ye.O., Marchenko N.B., Chubko L.S.

MODERNIZATION OF THE RETINAL VISUAL PROSTHESIS TO OBTAIN A HIGH-QUALITY IMAGE FROM THE RETINAL IMPLANT.....	35

Osadchuk O.V., Martyniuk V.V., Evseeva M.V., Martyniuk G.I.

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND MAGNETIC FIELD ON THE PHYSICAL PARAMETERS OF (COPPER, BISMUTH) CONTAINING B-DIKETONATE.....	44

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Valuiskiy S.V., Lysenko O.I., Hiruk D.O.

LOAD BALANCING METHOD IN SDN NETWORKS BASED ON OPENFLOW.....	51

Herashchenko A.Yu., Lebedev D.Yu.

TECHNOLOGY FOR PREDICTING THE PARAMETERS OF 802.11 WIRELESS NETWORKS FOR ADAPTIVE OPTIMIZATION.....	59

Yesych D.V., Lebedev D.Yu.

IMPLEMENTATION OF A SOFTWARE MODULE FOR MODELING INTERFERENCE IN WIRELESS NETWORKS BASED ON 802.11 STANDARDS WITHIN THE NS-3 SIMULATOR....	66

Mikhnenko Ya.O.

QUALITY OF SERVICE ANALYSIS IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS.....	73

Shusta V.I., Biganych V.Yu., Shusta V.S., Yevych M.Ya., Shusta V.Yu.

ELECTRONIC COMMUNICATIONS IN EDUCATION: FROM DISTANCE LEARNING TO ONLINE RESOURCES.....	79

Tykhonov M.V., Kononova I.V.

AN IMPROVED METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING BILATERAL RELIABILITY ESTIMATES OF COMMUNICATION DEVICES WITH A COMBINED TIME RESERVE.....	86

Shevtsov K.O., Zhivkov O.P.

MICROWAVE METAMATERIAL STRUCTURES BASED ON SIW WAVEGUIDES AND RESONATORS.....	91

POWER ENGINEERING

Abdulin M.Z., Kunyk A.A.

INFLUENCE OF HYDROGEN ADMIXTURES ON THE OPERATION OF COMBINED JET-NICHE MODULES DURING PROPANE-BUTANE COMBUSTION.....98

Bozhenko M.F.

METHODOLOGY FOR SELECTING SURFACE FLUE GAS HEAT RECOVERY UNITS IN BOILER HOUSES.....107

Boshkov L.Z., Volgusheva N.V., Hrechanovskyi A.P., Garanin Ye.V.

COEFFICIENTS OF DIFFUSION AND THERMAL DIFFUSION OF MOISTURE IN A DENSE LAYER OF ZEOLITE 13X.....114

Pantielieieva I.V.

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ELEGAS ELECTRICAL EQUIPMENT IN ENERGY SYSTEMS.....120

Rindyuk D.V., Bednarska I.S.

INFLUENCE OF STEAM SCREEN ON STRESS-DEFORMED STATE OF CONTROL VALVE.....128

CHEMICAL TECHNOLOGY

Andriianova M.V., Prykhodko D.M., Koval D.S., Yasnohor M.V., Holovenko V.O., Chervakov O.V.

ANTI-CORROSION COATINGS FOR PROTECTION OF METAL STRUCTURES.....135

Buket O.I., Butenko O.S.

INDUCTIVE COMPONENT OF IMPEDANCE AS A MARKER OF ELECTROCHEMICAL CORROSION OF STEEL ANODES IN MINERAL OIL.....142

Dudka M.V., Vorobiova V.I.

ANTIOXIDANT PROPERTIES OF COMPOUNDS DERIVED FROM HOP CONES (*HUMULUS LUPULUS*): A QUANTUM-CHEMICAL PERSPECTIVE.....148

Zabaluyev A.S., Ushchapovskyi D.Yu., Vorobyova V.I., Vasilyev G.S., Linyucheva O.V.

ELECTROCHEMICAL, MECHANICAL AND CATALYTIC PROPERTIES OF NICKEL-BASED GALVANIC COATINGS.....155

Ivanchenko A.V., Sokol O.D.

PRODUCTION OF CHEMICALLY ACTIVATED SORBENTS FROM SECONDARY RAW MATERIALS AND THEIR TESTING FOR THE REMOVAL OF DYES FROM WASTEWATER.....164

Ivaniuta S.P., Ivanenko O.I., Plashykhin S.V., Abramova A.O.

EVALUATING THE RISKS TO UKRAINE'S INFRASTRUCTURE IN A WARTIME CONTEXT.....170

Koval M.G.

STUDY OF COTTON FABRICS DYEING WITH DIRECT DYES WITH REUSE OF TREATED WASTEWATER.....180

Maizelis A.O.

CONTACT DISPLACEMENT OF COPPER IN PYROPHOSPHATE-SULFOSALICYLATE ELECTROLYTE FOR COPPER PLATING.....189

Melnyk L.I., Sviderskyi V.A., Donii O.M.

THE INFLUENCE OF MINERAL FILLERS ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF POLYMER COMPOSITES.....197

Mitina N.B., Mitina Yu.O.

PROCESSING OF POLYMERIC WASTE BY VERMICULTURE.....205

Morozova O.M., Fedorenko O.Yu., Hevorkian E.S.

APPLICATION OF WEIBULL STATISTICS IN MECHANICAL PROPERTIES DESCRIPTION OF CERAMIC MATERIALS.....211

Moshchenko A.S., Vorobiova V.I.

SKIBA RESEARCH OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF DEEP-EUTETIC SOLVENTS BASED ON CHOLINE CHLORIDE.....217

Sgadov S.O.

AN ALGORITHM FOR COMPOSITION MODELING OF NEAR-SURFACE LAYERS OF SOLIDS UNDER THE INFLUENCE OF ACTIVATED GAS PHASE.....224

Frolova L.A., Rodin D.O., Nikitin M.O. INFLUENCE OF COMPOSITION AND SYNTHESIS PARAMETERS ON COLOR AND PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF FE-AL-CO SPINEL PIGMENTS.....	230
Shkoda V.O., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. STUDIES OF ADSORPTION CAPTURE OF PLATINUM LOST DURING CONTACT OXIDATION OF AMMONIA IN THE PRODUCTION OF NITRIC ACID.....	237

TRANSPORT

Boiko S.M., Kotov O.B., Raida I.M., Lebid H.O., Boiko O.S., Deryabina I.O. PROSPECTS FOR THE ORGANIZATION OF MULTIMODAL TRANSPORT NODES IN THE ASPECT OF AIRPORT INFRASTRUCTURE RENOVATION.....	243
Vyshnevskiy D.O., Vyshnevskaya O.D. SPECIFICS OF FLEET OPERATION WITHIN ORGANIZATION OF CARGO CARRIAGES.....	249
Voichenko T.O., Tryshyn V.V., Riashchenko O.I., Lisovskiy S.V. THE STUDY OF THE VESSELS PROPULSION COMPLEXES OPERATION PROBLEMS WITH SEMI-SUBMERSIBLE PROPELLERS.....	255
Herasymenko I.M., Pron S.V., Vysotska I.I., Soloviova O.O. APPLICATION OF PILOTLESS AIRCRAFTS IS DURING REALIZATION OF MONITORING IN RELATION TO THE STATE OF FOREST ARRAYS IN POST-WAR TIME	263
Hordieiev M.H. POTENTIAL AND CHALLENGES OF AI-BASED AUTOMATIC NAVIGATION AND SHIP CONTROL.....	270
Lovska A.O., Muradian A.O., Rukavishnikov P.V., Demydiakov O.V. SPECIFICS OF CALCULATION OF THE HATCH COVER STRENGTH OF AN OPEN WAGON LOADED BY A REMOVABLE MODULE FOR FIXING CONTAINERS.....	276
Okorokov A.M., Bekh P.V., Lashkov A.V. ORGANIZATION OF INTERNATIONAL MULTIMODAL TRANSPORTATION WITH RISKS IN MIND.....	283
Petrov L.M., Kishianus I.V., Petryk Yu.M., Borysenko T.M., Mogilianets T.M., Verpivskiy S.M., Malinovskiy O.A., Maslich N.Ia., Shelushin S.V., Nikishyn V.A. THEORY L.M. PETROV WITH APPENDICES YU.M. PETRYKA FOR A WHEELED MACHINE WITH A KINEMATIC CONNECTION.....	289
Podolian V.O. AUTOMATION OF TRANSPORT PROCESSES USING IT SOLUTIONS.....	295
Prokudin G.S., Melnykov I.A., Poliak P.K. FORECASTING THE MOVEMENT OF VEHICLES ACROSS THE CUSTOMS BORDER OF UKRAINE.....	301
Reshetkov D.M., Koskina Yu.O. DECARBONIZATION OF SEA CARRIAGES – REQUIREMENTS AND PERSPECTIVES.....	308
Semychayevskiy S.V., Prisyajnyuk V.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V., Svirskiy V.V. ABOUT THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC PRIMING STANDARDS EQUIPPED WITH PORTABLE FLAME EXHAUSTERS OF WHEEL TRANSPORT VEHICLES.....	315
Silvanska H.M. MODERN CLASSIFICATION AND STRUCTURE OF PASSENGER TRANSPORTATION.....	323
Stepanov O.V., Volobuyeva T.V., Zhdanov O.O. OPTIMAL FREQUENCY OF REPLACEMENT OF FREIGHT VEHICLE UNITS WHEN REACHING A GIVEN OPERATING TIME.....	335
Stepanov O.V., Kuvshinov A.O. ADAPTIVE SYSTEM OF FREIGHT VEHICLES MAINTENANCE.....	342
Trofymenko I.V., Voichenko T.O., Plita L.L., Fedunov V.M. DEVELOPMENT OF PROPOSALS FOR THE APPLICATION OF METAHEURISTIC ALGORITHMS IN THE PROBLEMS OF MULTIAGENT ROUTING OF SEA FREIGHT TRANSPORTATION.....	348

Urum N.S., Mannapova O.V., Riashchenko O.I., Lisovskyi S.V. COMPARISON OF COMBUSTION EMISSIONS OF THE LATEST LOW-SULPHUR MARINE FUELS.....	355
Fomin O.V., Kozynka O.S., Skok P.O., Cherkashin O.P., Krasulin O.S. PROSPECTIVE CONCEPTS OF CAR BODIES FOR GONDOLA CARS USING NEW MATERIALS AND PROTECTIVE COATINGS.....	364
Chernenko P.V., Bondar Ye.V., Kruglov O.V. PROPOSALS FOR CREATING AN AUTOMATED WORKPLACE FOR MATERIAL AND TECHNICAL ACCOUNTING TOOLS FOR THE REPAIR OF ARMORED TANK VEHICLES ...	370
Shapenko Ye.M., Kotova S.O., Bilonoh O.V., Yaroshevskyy V.V. THE ROLE OF INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS IN THE DEVELOPMENT OF URBAN LOGISTICS UNDER THE SMART CITY CONCEPT.....	376
Shevchenko A.P., Yakusevych Yu.H., Dorofieieva Z.Ia., Tryshyn V.V. SOME PROBLEMS OF SEAFARER TRAINING AGAINST THE BACKGROUND OF THE INTRODUCTION OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE MARITIME TRANSPORT	382
Shpak N.G., Pavlovska L.A., Korobkova O.M. DIGITAL TRANSFORMATION OF THE SEA PORT MANAGEMENT SYSTEM: THE NEWEST OPPORTUNITIES AND CHALLENGES IN THE CONDITIONS OF THE STATE OF MARTIAL.....	389
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	395

УДК 621.865.8(031)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/01>**Поліщук М.М.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ткач М.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДИФІКАЦІЯ СТОПИ КРОКУЮЧОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Однією з проблем експлуатації крокуючих роботів, зокрема антропоморфних конструкцій, є забезпечення їх стійкості під час руху поверхнями з різними фізико-механічними характеристиками. Домінуючими факторами впливу на стійкість крокуючого робота є швидкість і прискорення його руху, маса робота, включаючи корисне навантаження, положення центру тяжіння, а також питомий тиск на ґрунт, яким переміщається робот. Запропонована у статті принципово нова конструкція ступні ноги крокуючого робота дозволяє регулювати питомий тиск на ґрунт за допомогою зміни площі опорної поверхні робота. При переході крокуючого робота з твердої поверхні на сипучі ґрунти, наприклад, такі як пісок, сніг, м'які болотисті ґрунти та інші, нова конструкція ступні дозволяє в автоматичному режимі збільшувати площу опори і тим самим зменшує питомий тиск на ґрунт, а отже, підвищує стійкість робота. І, навпаки, при переході мобільного робота з м'якого ґрунту на тверду поверхню бажано зменшувати площу опорної поверхні робота для збільшення швидкості його руху. Така зміна режиму руху робота досягається завдяки оснащенню стоп його ніг індуктивними датчиками, що контролюють величину заглиблення крокуючого робота у сипучий ґрунт. При чому, вказаними датчиками оснащена кожна нога робота, що надає додаткову перевагу, а саме зберігати стійкість руху при різних питомих тисках на ногах крокуючого робота. Регулювання в автоматичному режимі питомого тиску робота на ґрунт дозволяє здійснити адаптацію стійкості крокуючого робота до різноманітних топологій поверхонь, за якими рухається робот.

В рамках даних досліджень отримані аналітичні залежності для розрахунку параметрів нової ступні крокуючого робота, а саме величини переміщень пальців ступні, їх швидкості, змінної опорної площі ступні, питомого тиску на ґрунт та міцності пружних елементів ступні робота. Також наведено графічні залежності зазначених параметрів у вигляді діаграм, які допоможуть дослідникам та інженерам створювати подібні конструкції зі змінним тиском на ґрунт. Головною мотивацією даних досліджень було підвищення стійкості крокуючого робота внаслідок регулювання питомого тиску різні ґрунти, якими може рухатися мобільний робот.

Ключові слова: мобільні роботи, крокуючі механізми, антропоморфні конструкції, педипулятори, стійкість робота.

Постановка проблеми. Не дивлячись на різноманітність сучасних моделей крокуючих роботів, досі відсутні антропоморфні конструкції, спрямовані на зміну площі опорної поверхні робота з метою регулювання тиску на ґрунт. Крім конструктивних рішень зазначених роботів, необхідно також визначити аналітичні залежності між такими параметрами, як величини переміщень пальців ступні, їх швидкості, змінної опорної площі ступні, питомого тиску на ґрунт та міцності пружних елементів ступні робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та експериментальні дослідження в галузі синтезу крокуючих роботів обумовлені їхньою більшою універсальністю функцій у порівнянні з роботами на колісній або гусеничній трансмісії. У роботі [1, с. 1016–1012] запропоновано конструкцію ніг робота на основі інтелектуального управління сервоприводами. Однак у цій роботі стопи ніг робота не мають здатності до трансформації їх форми або розмірів. У роботі [2, с. 7–9] зазначено, що дизайн стопи дуже

впливає на якість контакту із землею, а в статті [3, с. 2–3] запропонована конструкція гнучкої ступні робота для амортизації ударних навантажень ступні. Однак у цих дослідженнях не передбачається зміни розмірів ступні робота у процесі ходьби. Результати досліджень [4, с. 3–5] свідчать про необхідність урахування впливу фізико-механічних властивостей різних ґрунтів на динаміку ходьби робота, у тому числі й сипучих ґрунтів. У роботі [5, с. 4] надана інформація про контактні сили між стопою та землею на основі вимірювання сили тривісним сенсорним пристроєм.

Дослідження [6, с. 520] ілюструють ходьбу гуманоїдного робота, який має по 6 ступенів свободи в кожній нозі та по 1 ступені свободи в кожній ступні. Однак у зазначених роботах не передбачається можливість зміни форми ступні робота. Оригінальні конструкції ступні ноги крокуючого робота наведені в роботах [7, 8], але загальною ознакою наведених технічних рішень є відсутність зміни питомого тиску ніг робота на ґрунт. Податливі механізми ступні робота [9] і гуманоїдна стопа робота з м'язовими приводами [10, с. 2904–2906], а також робот-гуманоїд [11, с. 2–6] і мініатюрний робот [12, с. 189–190] дозволяють адаптувати ноги робота до різних топологій ґрунтів, по яких переміщається робот, що крокує, проте без зміни питомого тиску на ґрунт.

Досить ефективні конструкції ступні ніг робота для стабілізації ходьби запропоновані в роботах [13, 14], а також біотехнологічна роботизована стопа [15, с. 631–632] з конічним зубчастим зачепленням дозволяє компенсувати момент нищпорення при двоногій ходьбі, що також вирішує задачу стабілізації руху робота. У роботі [16, с. 110] у конструкції ступні робота застосовані плоскі пружини з торсіонною підвіскою, яка знижує чутливість ступні до динамічних збурень. Однак, як і в попередніх роботах, ступні робота мають постійну площу опори на ґрунт, що не дозволяє змінювати питомий тиск на ґрунт при переміщенні сипучими ґрунтами. У роботі [17] запропоновано конструкцію ступні робота у вигляді гнучкої пластини зі змінною жорсткістю. Дане технічне рішення забезпечує адаптацію ступні до поверхні переміщення та забезпечує надійний контакт ступні з поверхнею. Антропоморфні конструкції ніг робота також дозволяють адаптувати переміщення робота до поверхонь із різною топологією [18, с. 728]. Однак в обох зазначених випадках загальна площа ступні залишається постійною і не змінюється під час пере-

ходу ноги робота з твердого ґрунту на сипучий ґрунт, що не дозволяє змінювати питомий тиск на поверхню при переміщенні робота. У дослідженнях [19, с. 22; 20, с. 7; 21, с. 58] підвищення стійкості крокуючих роботів пропонуються вдосконалені алгоритми управління ходьбою робота, але без зміни конструкції ступні ніг робота.

Таким чином, аналіз наведених вище досліджень показує, що проблема підвищення стійкості крокуючих роботів на основі регулювання питомого тиску на ґрунт за допомогою зміни площі опори ступні залишається актуальною.

Постановка завдання. Необхідно створити стопу крокуючого робота з перемінною площею опорної поверхні, що дозволить змінювати питомий тиск робота на поверхню переміщення і, тим самим, сприяти стабілізації стійкості крокуючого робота. Також для надійного функціонування вказаної стопи необхідно розробити аналітичні залежності між величинами переміщень пальців ступні, їх швидкості, змінної опорної площі ступні, питомого тиску на ґрунт та міцності пружних елементів ступні робота. На основі отриманих аналітичних залежностей необхідно здійснити моделювання функціонування стопи.

Виклад основного матеріалу. *Конструкція стопи.* Для кращого розуміння запропонованої нижче аналітичної моделі спочатку розглянемо принципово нову конструкцію [22, с. 5–8] стопи. На рис. 1 показана 3D модель стопи крокуючого робота, яка має здатність змінювати площу опори, а на рис. 2 наведено кінематичну схему ступні. Ступня ноги мобільного робота містить центральний палець, який на рис. 1 умовно показаний у перерізі для кращого розуміння його приводу.

Центральний палець утворює корпус ступні і в ньому розміщена самогальмуюча гвинтова передача. Ця гвинтова передача складається з гвинта та гайки, яка встановлена у напрямних центрального пальця і створює з ним кінематичну пару поступального руху. Гвинт встановлений на підшипниках кочення та через муфту з'єднаний з електричним двигуном. На валу електричного двигуна встановлений енкодер, тобто пристрій, який перетворює кут повороту вала двигуна в електричний сигнал для управління двигуном.

По обидва боки центрального нерухомого пальця симетрично розміщені рухомі пальці 1, 2 і пальці 3, 4. Рухомі пальці встановлені в корпусі ступні на шарнірних опорах і з'єднані з гайкою гвинтової передачі важелями, які також встановлені на шарнірних суглобах гайки та кожного рухомого пальця. Таким чином, рухомі пальці

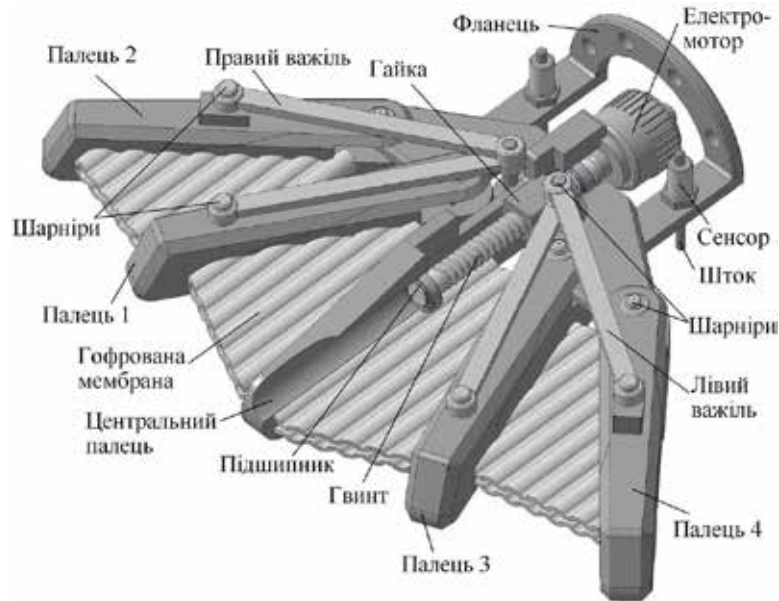


Рис. 1. Конструкція ступи крокуючого робота

утворюють з корпусом ступні та гайкою обер-тальні кінематичні пари. Між рухомими паль-цями закріплені еластичні гофровані перетинки, які мають здатність розтягуватися зі збільшенням площі опори ступні на ґрунт. На корпусі ступні, який утворює центральний палець, встановлені датчики зі штоками для контролю величини зану-рення ступні в сипучий або м'який ґрунт, яким рухається крокуючий робот. Фланець з отворами призначений для кріплення ступні до гомілки ноги крокуючого робота.

Ступня працює в такий спосіб. У початко-вому стані, тобто при переміщенні ніг робота по твердих ґрунтах, пальці 1 і 2 (також пальці 3 і 4) знаходяться під мінімальними кутами α_1 і β_1 (див. рис. 2) щодо центрального пальця, що забез-печує мінімально можливу площу опори ступні.

У разі зміни топології поверхні, якою руха-ється крокуючий робот, тобто коли ноги робота переходять на сипучі або м'які ґрунти (наприклад, пісок, сніг або заболочені ґрунти) виникає загроза заглиблення ніг робота в ґрунт і як наслідок втрата стійкості робота. Для попередження такого явища після контакту з м'яким ґрунтом штоки входять у індуктивні датчики (див. рис. 1) і цим виробля-ється пропорційний сигнал на включення елек-тричного двигуна. Останній передає гвинту обер-тання, що повідомляє лінійний рух гайки на певну величину «X» (див. рис. 2). Після проходження гайкою цієї відстані важелі повертають рухомі пальці 1 і 2 (а також пальці 3 і 4) на відповідні кути повороту α_2 та β_2 . Нове положення пальців показано на рис. 2 штрих-пунктирними лініями.

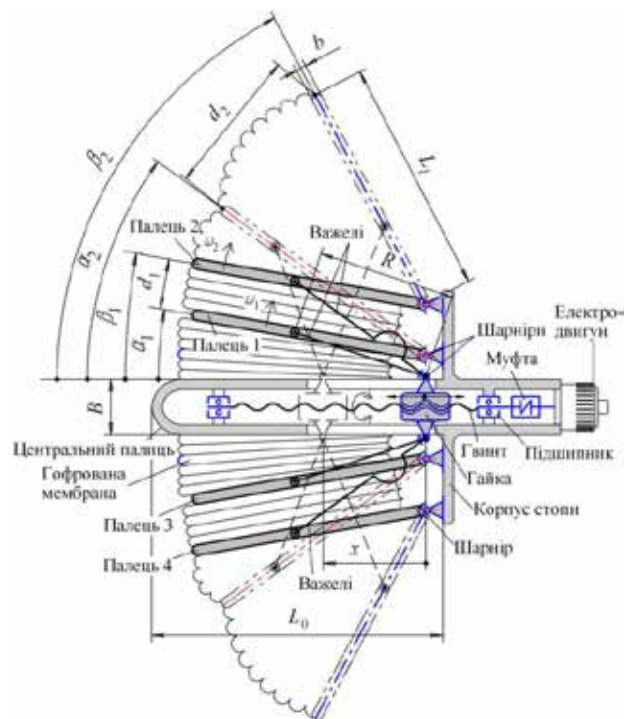


Рис. 2. Кінематична схема ступи зі змінною площею опори на ґрунт

Рухливі пальці при повороті навколо шарнірних суглобів розтягують гофровані перетинки, встановлені між пальцями. В результаті повороту пальців та деформації гофрованих перетинок збільшується площа опори ступні на ґрунт. Внаслідок збільшення площі опори ступні на ґрунт зменшується питомий тиск ніг робота на ґрунт, яким вони рухаються. В результаті запобігається

заглиблення стопи в м'який або сипучий ґрунт. Таким чином зазначені дії сприяють підвищенню стійкості крокуючого робота.

Для можливості проектування аналогічних стоп із змінною площею опори на ґрунт далі пропонується методика розрахунку параметрів, яка включає кінематичний аналіз та розрахунок змінної площі стопи для визначення питомого тиску на ґрунт. Також наведено аналітичні та графічні залежності параметрів стопи, які можуть бути використані дослідниками та інженерами для моделювання аналогічних конструкцій стопи.

Кінематичний аналіз стопи. На рис. 3 показано кінематичну схему пальця 1 (див. також рис. 2). Аналогічну конструкцію має і симетричний палець 3. Палець 1 має довжину AA_1 , шарнірно встановлений у суглобі і при включенні електродвигуна повертається навколо точки суглоба A . Важіль CB , який передає рух пальцю AA_1 , закріплений шарнірно в точці C на пальці і в точці B на приводній гайці, яка здійснює поступальний рух на величину « x ». Початковий кут нахилу пальця 1 (також симетричного пальця 3) дорівнює α_1 . У процесі повороту пальця відстань AC залишається постійною, тобто $AC = AC_1 = \text{Const}$.

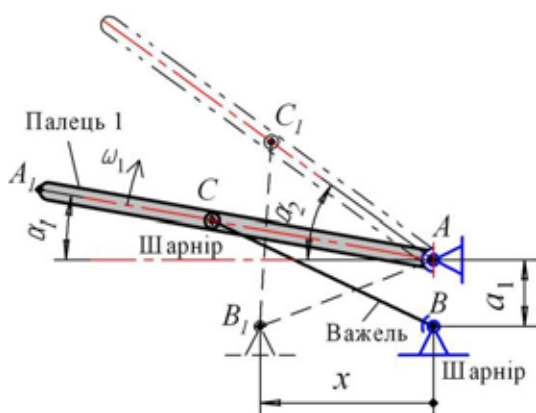


Рис. 3. Кінематична схема механізму пальця 1 (див. також рис. 2)

З трикутника $\triangle ABC$ за теоремою косинусів маємо співвідношення

$$BC^2 = AC^2 + AB^2 - 2ACAB \cos(\angle CAB), \quad (1)$$

де $AB = a_1$, $\angle CAB = 90^\circ + \alpha_1$.

З рівняння (1) знаходимо:

$$AC = \sqrt{R^2 - (a_1 \cos(\alpha_1))^2 - a_1 \sin(\alpha_1)} \quad (2)$$

Після переміщення гайки на величину $BB_1 = x$ із трикутника $\triangle ABB_1$ визначаємо:

$$AB_1 = \sqrt{x^2 + a_1^2}, \quad (3)$$

а з трикутника $\triangle AB_1C_1$ знаходимо кут $\angle C_1AB_1$

$$\angle C_1AB_1 = \arccos \left(\frac{AC^2 + a_1^2 + x^2 - R^2}{2AC\sqrt{x^2 + a_1^2}} \right). \quad (4)$$

Тоді, у довільний момент часу кут нахилу пальця 1 (AA_1 , див. також рис. 3) у напрямку руху обчислюємо за формулою:

$$\alpha_2 = \angle C_1AB_1 + \angle B_1AB - \frac{\pi}{2} = \arctg \left(\frac{x}{a_1} \right) + \arccos \left(\frac{AC^2 + a_1^2 + x^2 - R^2}{2AC\sqrt{x^2 + a_1^2}} \right) - \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Якщо гвинт робить N об/хв., його кутова швидкість $\omega = \frac{\pi N}{30} \text{ рад/с}$ і переміщення « x » гайки протягом t секунд, а також її лінійна швидкість « V » дорівнюватиме

$$x = \frac{Ns}{60}t; \quad V = \frac{dx}{dt} = \frac{Ns}{60} \text{ м/с}, \quad (6)$$

де s – крок гвинтової лінії приводного гвинта. Знайдемо кутову швидкість повороту пальця 1 (також і симетричного пальця 3)

$$\omega_1 = \frac{d\alpha_2}{dt} = \frac{Ns}{60} \left(\frac{a_1}{a_1^2 + x^2} - \frac{x \left(1 + \frac{R^2 - AC^2}{a_1^2 + x^2} \right)}{2AC \sin(\angle C_1AB_1) \sqrt{x^2 + a_1^2}} \right) \quad (7)$$

На рис. 4 показана кінематична схема пальця 2 (див. також рис. 2). Аналогічну конструкцію має симетричний палець 4. Початковий кут нахилу пальця 2 (також і симетричного пальця 4) дорівнює β_1 . У процесі повороту пальця відстань A_2C_2 залишається постійною, тобто $A_2C_1 = A_2C_2 = \text{Const}$.

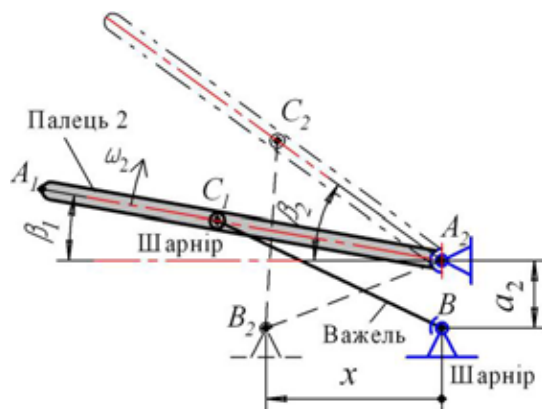


Рис. 4. Кінематична схема механізму пальця 2 (див. також рис. 2)

Аналогічні формули одержуємо і для пальця 2 (також і для симетричного пальця 4). По теоремі косинусів для відрізка A_2C_2 маємо співвідношення

$$A_2C_2 = \sqrt{R_1^2 - (a_2 \cos(\beta_1))^2} - a_2 \sin(\beta_1), \quad (8)$$

де a_2 – віддаль від шарніра пальця 12 до шарніра гайки у початковому положенні; β_1 – кут, що утворює палець 2 з напрямком руху у початковому положенні. Відповідно, відстань A_2B_2 і кути $\angle B_2A_2B$, $\angle C_2A_2B_2$ обчислюємо за формулами:

$$\begin{aligned} A_2B_2 &= \sqrt{x^2 + a_2^2}; \quad \angle B_2A_2B = \arctg\left(\frac{x}{a_2}\right); \\ \angle C_2A_2B_2 &= \arccos\left(\frac{(A_2C_2)^2 + a_2^2 + x^2 - R_1^2}{2A_2C_2\sqrt{x^2 + a_2^2}}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Кут між пальцем 12 і напрямком руху у довільний момент часу

$$\begin{aligned} \beta_2 &= \arctg\left(\frac{x}{a_2}\right) + \\ &+ \arccos\left(\frac{(A_2C_2)^2 + a_2^2 + x^2 - R_1^2}{2A_2C_2\sqrt{x^2 + a_2^2}}\right) - \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Знайдемо кутову швидкість повороту пальця 2

$$\omega_2 = \frac{d\beta_2}{dt} = \frac{Ns}{60} \left(\frac{\frac{a_2}{a_2^2 + x^2} - x \left(1 + \frac{R_1^2 - (A_2C_2)^2}{a_2^2 + x^2} \right)}{2A_2C_2 \sin(\angle C_2A_2B_2) \sqrt{x^2 + a_2^2}} \right) \quad (11)$$

Визначення питомого тиску на ґрунт. Площа контакту ступні із ґрунтом, по котрому рухається робот, складається з площі центрального пальця $S_o = BL_o$ (див. рис. 2), площі пальців і площі гофрованих перетинок. Площі крайніх пальців 2 і 4 визначимо як $\dot{u}_{2,4} = 2 \cdot \dots$. Якщо лінію крайнього пальця 2 продовжити до перетину з центральним пальцем, то утворяться два кругових сектора: один радіуса $r_1 = L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta}$ і другий радіуса $r_2 = 0.2L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta}$, а загальну пощу контакту ступні із ґрунтом можна визначити так:

$$S = S_o + S_{2,4} + 2\left(\frac{1}{2}\beta r_1^2 - \frac{1}{2}\beta r_2^2\right), \quad (12)$$

де коефіцієнт 2 враховує також площину сектора між центральним пальцем та пальцем 4; β (рад) – центральний кут кругового сектора.

У розгорнутому вигляді площа контакту ступні з ґрунтом визначається як

$$S = BL_o + 2bL_1 + \beta \left(L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta} \right)^2 - \beta \left(0.2L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta} \right)^2. \quad (13)$$

Питомий тиск робота на поверхню контакту із ґрунтом знаходимо за формулою

$$\begin{aligned} p &= \frac{\frac{1}{2}(m + 2m_1)g}{S} = \\ &= \frac{\frac{1}{2}(m + 2m_1)g}{BL_o + 2bL_1 + \beta \left(L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta} \right)^2 - \beta \left(0.2L_1 + \frac{a_2}{\sin \beta} \right)^2}, \end{aligned} \quad (14)$$

де m – маса робота; m_1 – маса однієї ноги робота; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,82 \text{ м/с}^2$.

Аналіз результатів моделювання. На основі вище зазначених формул (5) та (10) побудовано графіки зміни кутів повороту пальців (рис. 5) щодо центрального пальця ступні.

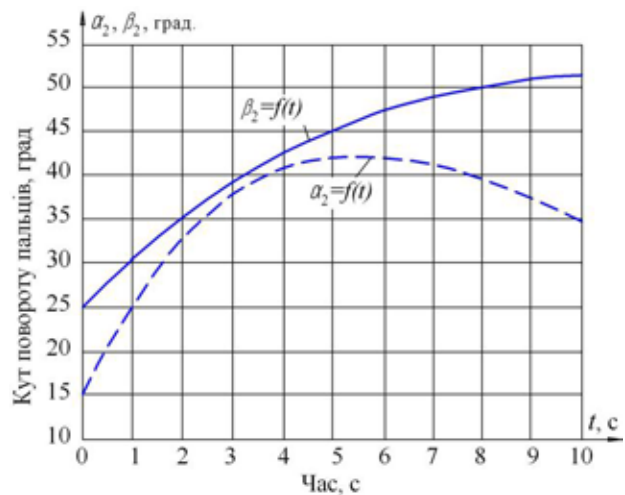


Рис. 5. Графіки зміни кутів повороту пальців відносно центрального пальця: при $a_1=0,02 \text{ м}$; $a_2=0,04 \text{ м}$; довжина важеля $C_1B=0,04 \text{ м}$ (див. рис. 3); довжина важеля $C_1B=0,1 \text{ м}$ (див. рис. 4)

Як видно з цих графіків, швидкість повороту пальців достатня для ефективної роботи ступні, причому зазначені графіки мають нелінійний характер, що слід враховувати при програмуванні приводу ступні крокуючого робота. На рис. 6 показано зміну кутових швидкостей пальців ступні залежно від часу.

Відомо, що зміна швидкості характеризує прискорення виконавчих механізмів, у разі це прискорення пальців ступні робота. Збільшення прискорень є небажаним, оскільки може призвести до зростання інерційних навантажень. Тому рекомендується не перевищувати прискорення на графіках рис. 6.

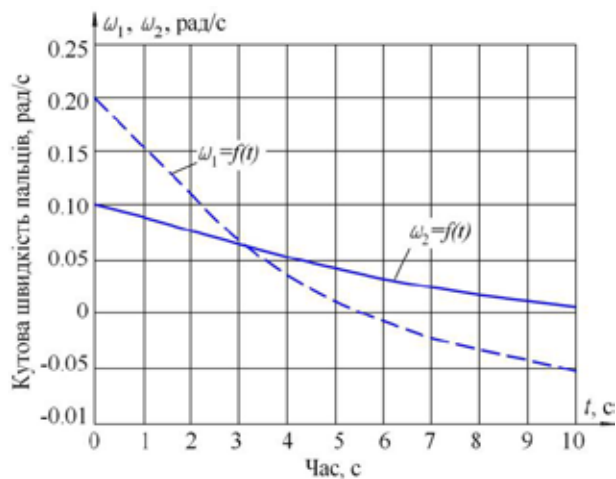


Рис. 6. Зміна кутових швидкостей пальців в залежності від часу: при $a_1=0,02$ м; $a_2=0,04$ м; довжина важеля $CB=0,04$ м (див. рис. 3); довжина важеля $C_1B=0,1$ м (див. рис. 4)

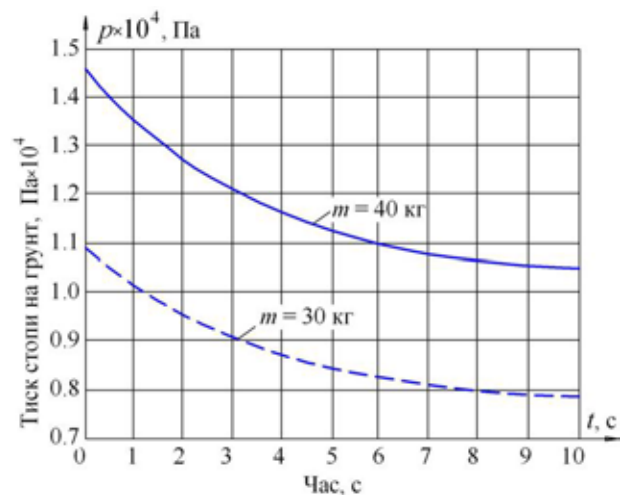


Рис. 8. Графіки зміни питомого тиску стопи робота на ґрунт

На підставі формул (12) та (13) отримані графіки рис. 7 зміни площі опори ступні робота при повороті пальців. Саме від площі опори ступні залежить її питомий тиск на ґрунт. Площа опори ступні та її тиск на ґрунт перебувають у зворотній пропорційній залежності, а саме: чим більша площа опори ступні, тим меншим буде питомий тиск на ґрунт, яким рухається робот.

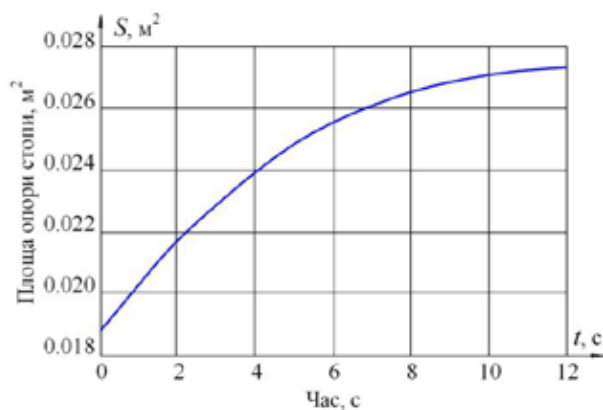


Рис. 7. Графік зміни площі опори стопи робота

На рис. 8 представлені графіки зміни питомого тиску на ґрунт, які отримані на підставі залежності (14) для різних мас робота: $m = 30$ кг та $m = 40$ кг. У випадках зміни маси крокуючого робота аналогічні графіки можуть бути отримані на підставі функціональної залежності (14), наведеної вище.

З цих графіків стає очевидним, що питомий тиск на ґрунт з часом зменшується завдяки збільшенню площі опори ступні робота. Це доводить доцільність регулювання площі опори ступні при

переході крокуючого робота на сипкі або пухкі ґрунти. Зрештою зменшення питомого тиску на ґрунт сприяє підвищенню стійкості крокуючого робота, що й вимагалось довести.

У запропонованій конструкції ступні робота між пальцями ступні встановлені гофровані перетинки з полівінілхлориду. Цей матеріал не є єдиним, можливо використовувати інші еластичні матеріали для перетинок між пальцями ступні. Важливо, щоб новий матеріал перетинок задовольняв умові міцності для унеможливлення руйнування еластичних перетинок між пальцями ступні. При цьому бажано, щоб межа міцності матеріалу еластичних перетинок при розтягуванні була не меншою $4 \cdot 10^7 \dots 7 \cdot 10^7$ Па, а модуль пружності Юнга був у межах $E = (2,6 \cdot 10^9 \dots 4,0 \cdot 10^9)$ Па. У цій статті товщина матеріалу перетинків та розміри гофрів прийняті для робіт масою до 50 кг, для робіт більшої маси рекомендується збільшити ці параметри. При цьому зазначені вище формули залишаються справедливими для розрахунку параметрів ступні.

Висновки. У цій статті авторами запропоновано принципово нову конструкцію ступні крокуючого робота, основною відмінністю якої є здатність змінювати площу опори ступні при зміні щільності ґрунту, яким переміщається робот. Ця властивість досягається за рахунок виконання ступні ноги робота у вигляді пальців з приводом їхнього повороту та наявності між пальцями ступні гофрованих еластичних перетинок. Позитивний ефект полягає в тому, що при збільшенні площі контакту ступні з ґрунтом зменшується питомий тиск робота на м'який ґрунт або сипу-

чий ґрунт, наприклад, такий як пісок, сніг, м'які ґрунти тощо. Також вперше в ступні застосовані датчики занурення ступні в м'який ґрунт. За сигналами цих датчиків надається можливим своєчасне збільшення площі контакту ступні для виключення втрати стійкості крокуючого робота.

Запропонована методика розрахунку параметрів ступні включає розрахунки розмірів, кінематичних характеристик та умов міцності ступні. Ця нова методика синтезу ступні дозволить дослідникам та інженерам, які працюють у галузі робототехніки, створювати аналогічні конструкції ніг крокуючих роботів. Діаграми зміни кінематич-

них характеристик, а також зміни площі контакту ступні з ґрунтом та питомого тиску на ґрунт, надають можливість моделювання нових аналогічних конструкцій ніг роботів.

В остаточному підсумку результати досліджень сприяють стабілізації руху мобільних роботів поверхнею довільної топології. Основним результатом цих досліджень є підвищення стійкості крокуючого робота за рахунок своєчасного збільшення площі контакту ступні з ґрунтом і, як наслідок, зниження питомого тиску робота на сипкі або м'які ґрунти, якими рухається крокуючий робот.

Список літератури:

1. Sujana Warnakulasooriyaa, Amin Bagheria, Nathan Sherburnb, Madhavan Shanmugavelc. Bipedal Walking Robot – A Developmental Design. International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS2012). Procedia Engineering 41 (2012) 1016–1021.
2. A. Roennau, G. Heppner, L. Pfozter, R. Dillmann. Foot Design Evaluation for a Six-Legged Walking Robot. Conference Paper September 2012, pp. 7–9. DOI: 10.1142/9789814415958_0066.
3. Lei Zhang, Xinzhi Liu, Ping Ren, Zenghui Gao and Ang Li. Design and Research of a Flexible Foot for a Multi-Foot Bionic Robot. Appl. Sci. 2019, 9, 3451; p. 19; doi:10.3390/app9173451
4. Briskin E.S., Chernyshev V.V. Modeling the dynamics of changing the stops of walking machines. “Artificial Intelligence” 3’2009; pp. 2–9.
5. Krzysztof Walas. Foot design for a hexapod walking robot. Pomiary Automatyka Robotyka No 2/2013, pp. 3–5.
6. L.B. Xian and M. Xie. Design of Human-Like Leg-Foot for Human-Assisted Biped Walking. ICIRA 2008, Part I, LNAI 5314, pp. 520–527, 2008.
7. Edapin E.N. Walking robot: Patent RU 2043915 Int. Cl. B25J 11/00. Filed: 09/07/1992; date of patent 09/20/1995.
8. Miyazaki Susumu, Takahashi Hideaki. Leg design of a robot moving on legs: Patent RU 2241595 Int. Cl. B25J 5/00. Filed 11/16/2001; date of patent 12/10/2004. Bull. No. 34.
9. Byoung-Ho Kim. Work Analysis of Compliant Leg Mechanisms for Bipedal Walking Robots. International journal advanced robotic systems, 2013, Vol. 10, 334: 2013.
10. Thomas W. Secord, H. Harry Asada. A Humanoid Foot with Polypyrrole Conducting Polymer Artificial Muscles for Energy Dissipation and Storage. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy, 10–14 April 2007; pp. 2904–2909.
11. Yucong Wu, Yang Pan, Xiaokun Leng and Zhicheng He. Kid-size robot humanoid walking with heel-contact and toe-off motion. (2022), PeerJ Computer science, DOI 10.7717/peerj-cs.797. P. 21.
12. Ilija Stevanović, Boško Rašuo. Development Of a Miniature Robot Based on Experience Inspired by Nature. FME Transactions. Volume 45, 1, 2017. pp. 189–191.
13. Shigeo Takizawa, Fujisawa. Caster for robot filed: Patent US 2002/0088083 Int. Cl. A47B 91/00. Mar. 8, 2002; date of patent: Jul. 11, 2002.
14. Toru Takenaka, Saitama, Keizo Matsumoto, Saitama, et al. Leg type mobile robot: Patent US 2006/02493 Int. Cl. B62D 51/06; filed: Apr. 28, 2005; date of patent: Nov. 9, 2006.
15. Tsung-Yuan Chen, Shunsuke Shigaki & Koh Hosoda. Bevel-gear mechanical foot: a bioinspired robotic foot compensating yaw moment of bipedal walking. Advanced robotics, 2022, Vol. 36, No. 13, 631–640. <https://doi.org/10.1080/01691864.2021.2017343>
16. Martijn Wisse, Daan G.E. Hobbelen, Remco J.J. Rotteveel, et al. Ankle springs instead of arc-shaped feet for passive dynamic walkers. HUMANOIDs’06, 2006 IEEE, pp. 110–116.
17. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G., et al. Foot for a walking space microrobot: Patent RU 2675327 Int. Cl. B25J 5/00. Filed: 11/17/2017; date of patent 12/18/2018. Bull. No. 35.
18. M. Polishchuk, M. Tkach, A. Stenin. Anthropomorphic Walking Robot: Design and Simulation. FME Transactions. VOL. 50, No 4, 2022, pp. 724–731, doi: 10.5937/fme2204724P
19. Khusainov R.R. Motion control system for a bipedal walking robot. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Kazan, 2018, pp. 22–30.

20. Austen Ya., Formalskiy AM, Chevallro K. Virtual four-legged robot: design, control, modeling, experiments. Fundamental and applied mathematics, 2005, volume 11, no. 8, p. 5–28.
21. Mihailo Lazarević. Optimal Control of Redundant Robots in Human-Like Fashion. FME Transactions, 2005, Vol. 33(2), pp. 53–64.
22. Поліщук М.М., Ткач М.М. Ступня ноги крокуючого мобільного робота: зареєстрована заявка на винахід України № а202303026; МПК В62 D57/02, заявлено 22.06.2023, УКРНОІБІ, 2023, с. 8.

Polishchuk M.M., Tkach M.M. MODIFICATION OF THE FOOT OF A WALKING MOBILE ROBOT

One of the problems of operating walking robots, in particular anthropomorphic structures, is to ensure their stability when moving on surfaces with different physical and mechanical characteristics. The dominant factors influencing the stability of a walking robot are the speed and acceleration of its movement, the mass of the robot, including the payload, the position of the center of gravity, as well as the specific pressure on the ground on which the robot moves. The fundamentally new design of the foot of a walking robot proposed in the article allows regulating the specific pressure on the ground by changing the area of the supporting surface of the robot. When a walking robot moves from a hard surface to loose soils, such as sand, snow, soft marshy soils and others, the new design of the foot allows automatically increasing the support area and thereby reducing the specific pressure on the ground, and, consequently, increasing the stability of the robot. And, conversely, when a mobile robot moves from soft ground to a hard surface, it is desirable to reduce the area of the supporting surface of the robot to increase its speed. This change in the robot's movement mode is achieved by equipping the feet of its legs with inductive sensors that monitor the depth of the walking robot's penetration into loose soil. Moreover, each leg of the robot is equipped with these sensors, which provides an additional advantage, namely, maintaining stability of movement at different specific pressures on the legs of the walking robot. Automatic adjustment of the robot's specific pressure on the ground allows the walking robot's stability to be adapted to the various topologies of the surfaces on which the robot moves. As part of these studies, analytical dependencies were obtained for calculating the parameters of the new foot of the walking robot, namely the magnitude of the toe movements, their speed, the variable support area of the foot, the specific pressure on the ground and the strength of the elastic elements of the robot's foot.

Graphic dependencies of these parameters are also provided in the form of diagrams that will help researchers and engineers create similar structures with variable pressure on the ground. The main motivation for these studies was to increase the stability of the walking robot by regulating the specific pressure on various soils on which the mobile robot can move.

Key words: mobile robots, walking mechanisms, anthropomorphic structures, pedipulators, robot stability.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 005.6:658.5:681.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/02>**Павленко В.Я.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ РОЗРОБКИ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ – НАДІЙНЕ ПІДґРУНТЯ ВИРОБНИЦТВА ЯКІСНОЇ ТА КОНКУРЕНТОЗДАТНОЇ ПРОДУКЦІЇ В СУЧАСНІЙ ОРГАНІЗАЦІЇ

Для досягнення найкращого результату роботи підприємства будь-якої форми власності необхідно приділяти увагу підвищенню конкурентоздатності, виконанню якісних показників на усіх етапах життєвого циклу виготовлення продукції. Якість будь-якої продукції забезпечується як в процесі виготовлення, так і на етапі її розробки. Комплект конструкторської документації (КД) на виріб є результатом процесу розробки або проектування [1, 2]. Грамотно розроблена КД дозволяє отримати всю необхідну інформацію про майбутній виріб: його конструкцію, габарити, вагу, способи виготовлення і необхідні для цього матеріали; вимоги нормативних документів; необхідність контролю або експертизи; особливості експлуатації. Одним із способів оцінки якості процесу розробки і проектування є кількість допущених помилок в КД. По даним статистичного аналізу 60–90% готової продукції виходить з ладу через наявність конструкторських помилок. Більша частина їх виявляється в процесі виготовлення і першого випробування виробу, а інша частина тільки в процесі експлуатації впродовж деякого часу, що скорочує міжремонтний процес виробу і ресурс його роботи в цілому. Виходячи з цього – від якості процесу розробки КД залежить підготовка і організація виробництва продукції високої стабільної якості.

В статті розглянуті практичні рекомендації щодо удосконалення управління процесом розробки КД на сучасному підприємстві. Проаналізовані конструкторські помилки та окреслені задачі підвищення якості розробки КД за рахунок впровадження мір, які дозволяють зменшити їх кількість, а також скоротити трудомісткість операцій нормативного контролю (далі нормоконтролю). Визначені переваги використання статистичних методів аналізу на підприємстві із застосуванням системи автоматизованого проектування і розрахунку (САПР), яка призначена для автоматизації технологічного процесу проектування виробу результатом якого є комплект проектно-конструкторської документації.

Ключові слова: конструкторська документація, конструкторська помилка, технічна документація, статистичний контроль.

Постановка проблеми Управління ходом розробки КД є задачею не простою, так як це процес важко керований. В результаті статистичного аналізу причин виникнення невідповідностей при розробці і проектуванні виробів на підприємстві виявлено, що доволі часто контроль КД є формальним і недостатнім з боку конструкторів і технологів (недостатньо кваліфікований та досвідчений персонал, недостатньо конкретно розроблено технічне завдання, не враховані зміни, які виникають в ході розробки, тощо). Значна кількість помилок формується з причини невідповідності КД вимогам нормативних документів (НД).

Відповідно, з метою зниження проценту браку при плануванні і організації виробництва необхідно приділити особливу увагу підбору компетентного і кваліфікованого персоналу, зокрема технологів, конструкторів, інженерів зі стандартизації, метрологів – задачами яких стануть питання зменшення помилок при проектуванні КД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проектування вимагає від фахівця (проектувальника) спеціальних предметних знань, а також методології і правил виконання проектних процедур. Численні українські та зарубіжні вчені постійно вивчають проблему зменшення кон-

структорських помилок в процесі проектування (розробки) КД. За статистикою найбільша кількість помилок виникає через нанесення помилкових розмірів і допустимих відхилень в креслениках. Ю.С. Рудь, В.П. Шпачук розглядають призначення, класифікацію, конструкцію, основи теорії та розрахунку механічних передач зачепленням та тертям, задачі деформування та руйнування твердих тіл при статичному та динамічному навантаженні [8,9]. О.В. Дебіро, С.В. Репінський вивчають питання розмірно-точнісного моделювання, побудови конструкторських розмірних ланцюгів, методи їх розрахунку, технологічні особливості та області використання методів забезпечення точності ланки замикання під час складання виробів. Етапи розмірно-точнісного моделювання технологічних процесів механічної обробки, що необхідно враховувати розробнику для уникнення помилок [12].

На сучасному виробництві велика кількість галузей науки і техніки комп'ютеризується і відбувається перенос достатньо великої кількості задач з ручного виконання на виконання з використанням електронно-обчислювальних машин (ЕОМ). Процес розробки КД не є виключенням. В.В. Багрій, С.К. Мещанінов, О.М. С'янов вивчають основні підходи до визначення процесу проектування, розглядають системні підходи при проектуванні електронних засобів [13]. К.С. Барандич, С.П. Вислоух, М.В. Філіппова розглядають методологічні та технологічні основи побудови САПР технологічних процесів (ТП): склад, структуру та компоненти автоматизованих систем проектування, а також основні підходи автоматизації вирішення задач технологічної підготовки виробництва [14].

На сьогодні не всі можливості, які дозволяють прискорити процес розробки КД є достатньо вивченими. Тому ці питання є актуальними і постійно потребують досконалості.

Постановка завдання. Для забезпечення конкурентоспроможності продукції (виробів) вимогам замовників (споживачів) необхідно приділяти велику увагу дотриманню існуючих законів, норм і положень, аналізу конструкторських помилок на усіх етапах життєвого циклу виробу а також контролю показників якості КД. Метою статті є методи оцінки стабільності протікання процесу розробки КД на сучасному підприємстві, способи зменшення конструкторських та технологічних помилок.

Виклад основного матеріалу Основний комплект КД виробу об'єднує конструкторські

документи, що відносяться до усього виробу (тобто складені на увесь виріб в цілому), наприклад, складальний кресленик, принципова електрична схема, технічні умови, експлуатаційні документи. Розробка креслеників – обов'язковий крок перед початком серійного або одиничного випуску продукції. В них наведені розміри, геометрія, тип обробки, матеріали та параметри деталі. Для досягнення високої якості необхідно дотримуватись вимог єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД), яка застосовується до усіх типів документів, що використовуються у виробництві. ЄСКД встановлює норми оформлення, розробки, обігу КД, що використовуються на всіх стадіях життєвого циклу виробу. Для створення систематизованої, упорядкованої, послідовно викладеної КД, яка у подальшому буде придатною для багаторазового використання необхідно виконати розрахунки, опрацювати конструкцію, та врахувати всі нюанси галузі. Тобто розробка та конструювання КД є творчим процесом в уяві конструктора, а причини виникнення конструкторських помилок закладені в суті цього процесу. Використовуючи дані технічного завдання (ТЗ), інформаційних матеріалів, практичного досвіду, конструктор створює уявний образ виробу за допомогою креслень. При переході уявного (ідеального) образу виробу до реального втілення, конструктору необхідно враховувати цілий ряд вимог та обмежень. Ці факти досить часто бувають суперечливими і не дозволяють створити той реальний вигляд виробу, до якого він прагнув. Розбіжність реальної якості виробу з еталоном служить критерієм досконалості конструкції. Якщо розбіжність більша, ніж середній інженерно-технічний рівень даного часу, то конструкцію можна вважати помилковою.

Конструкторська помилка – це відхилення результату, отриманого в результаті проектування і конструювання від прийнятих норм, закладених в ТЗ та обмеженнях, висунутих Замовником (габарити, вага, економічність виготовлення, матеріали та комплектувальні вироби, загальна вартість виробу)

Розрізняють явні та приховані помилки.

Явні (очевидні) помилки, виявляються при порівнянні конструкції з еталоном при контролюванні ТД. До них відносяться помилки розмірних ланцюгів і розрахунки на міцність, відхилення параметрів, таких як сила, швидкість, тиск, тощо.

Приховані помилки мають місце, як правило, в нових розробках, в яких застосовується ще не

перевірений практикою принцип роботи виробу або відсутня достатня кількість інформації для впровадження вже відомого принципу. Приховані помилки виявляють, як правило, експериментально, при випробуваннях дослідного зразка виробу.

Помилки в КД діляться на три групи (в кожену групу входить ряд віднесених до цієї групи помилок):

1 група – конструктивні помилки

1. Помилки викликані хибним (невірним) направленням розробки виробу. Такі помилки часто закладені ще в ТЗ на проектування і виникають через невірне розуміння тієї роботи, яку виріб повинен виконувати або процесів для яких він створений. Такі помилки повинні бути розкриті уже на початкових стадіях розробки: в технічній пропозиції, ескізного проєкту. Розробнику дається право на критичний аналіз ТЗ і виявлення усіх неточностей і похибок в ньому. Значну роль у цьому процесі відіграють начальники груп, головні інженери проєктів, провідні спеціалісти, які відповідають за правильний напрямок конструкторських розробок. Помилки невірного напрямку розробок відносяться до прихованих і не завжди виявляються при контролі КД і перевірці її відповідності ТЗ.

2. Помилки в функціональному призначенні виробу, що розробляється. Нові вироби повинні відповідати своїм функціям, бути ефективними та надійними.

3. Помилки при виборі матеріалів та комплексувальних виробів, коли властивості матеріалу та його технологічна обробка не забезпечує нормальну і надійну роботу усіх вузлів та механізмів. Помилки при використанні матеріалу (матеріал може бути використаний нерационально: із зайвою товщиною стінок, ребер тощо).

4. Помилки при виборі форми деталей (габаритів). Форма деталі повинна сприяти її виготовленню із матеріалу, вказаному в кресленнику найбільш ефективними технологічними методами.

5. Помилки в оцінюванні психологічних і соціальних сторін нового виробу (конструкція повинна відповідати новим вимогам експлуатації, враховувати методи сучасності, потреби споживачів, відповідності довкілля, тощо).

6. Помилки естетичного характеру і відповідності виробу вимогам техніки безпеки. Зовнішній вигляд виробу повинен бути привабливий і відповідати його функціональному призначенню. Температура, шум, вібрація виробу повинні бути в межах норми.

2 група – помилки в розрахунках

1. Помилки в розрахунках на міцність [8,10]. В результаті цих помилок розміри «небезпечних» перерізів¹ можуть вийти не виправдано малими або великими. При заниженому розмірі «небезпечних» перерізів відбувається передчасний вихід виробу з ладу або його поломка. Якщо «небезпечний» переріз збільшений – не виправдано зростає маса виробу і витрата матеріалу. Ці помилки ґрунтуються на недостатній або хибній оцінці реально діючих сил у виробі, прийнятті невірної розрахункової схеми, методики розрахунку або допущенні помилок в розрахунках.

2. Помилки в розрахунках на жорсткість [10]. Ці помилки приводять до вібрацій, які перевищують допустимі норми. В результаті вібрації виріб не може виконувати свої функції.

3. Помилки в розрахунках кінематичних схем. В результаті цих помилок виріб не буде відповідати параметрам, на які він розрахований.

3 група – помилки в розмірах

До цієї групи відноситься найбільша частина помилок [12].

1. Помилки в розрахунках розмірних ланцюгів. Вони виникають при невірних розрахунках розмірів і допустимих відхилень, в тому числі при невірному визначенні ходу механізму.

2. Помилки при визначенні розмірів вузьких місць механізму – в результаті чого виникають випадки неможливості складання виробу. Причини помилки: неточний розрахунок або розрахунок при якому не було враховано місце сполучення деталей.

3. Помилки через недбалість розробника. Такі помилки можуть бути допущені при розрахунку розміру або при записах правильно розрахованого розміру і допустимого його відхилення.

Помилки цієї групи виявляються в процесі перевірки креслеників і проявляються як невідповідність вказаного розміру фактичному значенню елемента конструкції у вказаному масштабі. Правильне нанесення розмірів і допустимих відхилень в креслениках є важливим процесом, який свідчить про якість КД. Велику роль тут відіграють головні фахівці та керівники груп конструкторів та технологів, які здійснюють 100%-вий контроль виконання креслеників деталей та складальних креслеників.

Поява помилок в КД зумовлена, як правило, певними мотивами. За ознаками виникнення помилки можуть бути мотивовані і немотивовані.

¹ Метод перерізів полягає в тому, що зрівноважене тіло умовно розрізають площиною на дві частини, будь-яку з них відкидають і замість неї до перерізу залишеної частини прикладають внутрішні сили. Залишену частину розглядають як самостійне тіло, яке перебуває в рівновазі під дією зовнішніх і прикладених до перерізу внутрішніх сил.

Мотивовані помилки мають певну базу виникнення. Вони як би мають логічне обґрунтування для їх виникнення, пов'язане з необізнаністю або недбалістю розробника. Мотивовані помилки можуть бути пов'язані також з масштабом кресленика (розміри проставляються по натуральній величині кресленика, хоча зображення виконано у збільшеному або зменшеному масштабі). Іноді розміри і допустимі відхилення отворів встановлюються на валах, а розміри і допустимі відхилення валів – на отворах. Отвори і вали можуть мати різні номінальні розміри тощо. Є випадки, коли невірні розміри з'являються через помилково виконане зображення розрізу або перетину. Недбалість розробника може привести до нанесення розмірів на іншій розмірній лінії, що гарантує помилку. Іноді не враховується довжина ходу механізму тощо.

Немотивованими помилками називають випадкові помилки, які дуже важко пояснити.

Помилки, які зустрічаються в КД, в залежності від викликаних ними наслідків класифікують чотирма класами (дивитись таблицю 1).

Оцінка якості розробки КД на сучасному виробництві зазвичай здійснюється за наступними показниками: відповідність параметрів КД

вимогам ТЗ; відповідність КД вимогам ЄСКД; виконання вимог технічних регламентів, міжнародних та галузевих стандартів; технічний рівень КД; виконання вимог до спеціальних характеристик об'єкту проектування; технологічність (зручність виготовлення); доступність та раціональність покупних комплектувальних виробів; інформативність КД; дотримання строків виконання робіт.

Послідовність дій по управлінню процесом розробки КД на сучасному підприємстві представлена на рисунку 1.

Діяльність конструкторського контролю розподіляється за типами об'єктів, що перевіряються, а саме: електронні моделі, кресленики, складальні кресленики, запозичені моделі, покупні вироби, тощо. Для кожного типу документу виявляють ключові ознаки, згідно яких об'єкт даного типу є придатним або таким, що не відповідає заданим умовам. Таким чином до проекту КД висувається істотна кількість вимог, які вимагають управління і контролю за їх виконанням. Ці вимоги розділені по зонам відповідальності: відповідальність технічних рішень перевіряється в рамках групи конструкторів [3]; за технологічне опрацювання конструкції відповідає група технологів [4, 5];

Таблиця 1

Класифікація помилок, виявлених в креслениках

Клас	Характеристика класу	Помилки
I	Помилки, які не впливають на роботоздатність виробу	<i>Недотримання правил креслення ЄСКД:</i> правил нанесення розмірів, позначень, тощо а також правил стандартизації та нормоконтролю. <i>Помилки в розрахунках</i> маси, технічних параметрів, не економічний вибір точності обробки елементів деталей. <i>Економічного характеру</i> (невигідне економічно через надто високу вартість). <i>Юридичного характеру</i> (безпатентний виріб).
II	Помилки, які погіршують роботоздатність і управління виробом	Не правильно вибраний матеріал, його термообробка, стійкість, міцність. Відсутність або недостатня кількість технічних вимог, пред'явлених до точності виготовлення та складання. Помилки у виборі допустимих відхилень розмірів сполучення поверхонь та у виборі шорсткості поверхонь тертьових частин або сполучень. Ергономічного характеру – органи управління не пристосовані до фізіологічних та антропометричних даних людини-оператора. Форма виробу не відповідає функціональному призначенню.
III	Помилки, які викликають виправний брак деталей, складальних одиниць	Помилки в розмірних ланцюгах або окремих розмірах; у виборі допустимих відхилень розмірів або сполучень поверхонь; в орієнтації окремих геометричних і конструктивних елементів деталі; у виборі комплектувальних виробів або виробів загального призначення; в технологічності деталі.
IV	Помилки, які викликають не виправний брак деталей, складальних одиниць та виробів в цілому	Невідповідність виробу призначенню та вимогам ТЗ. Помилки у виборі робочого механізму, його принципу роботи або фізичного процесу, який лежить в основі роботи. Помилка, яка є причиною невиконання намічених функцій окремими механізмами або виробом в цілому; у дотриманні умов складання (виріб не складається); в розмірах і в розмірних ланцюгах, в розрахунках; у виборі матеріалу (якщо заміна не можлива), тощо.



Рис. 1

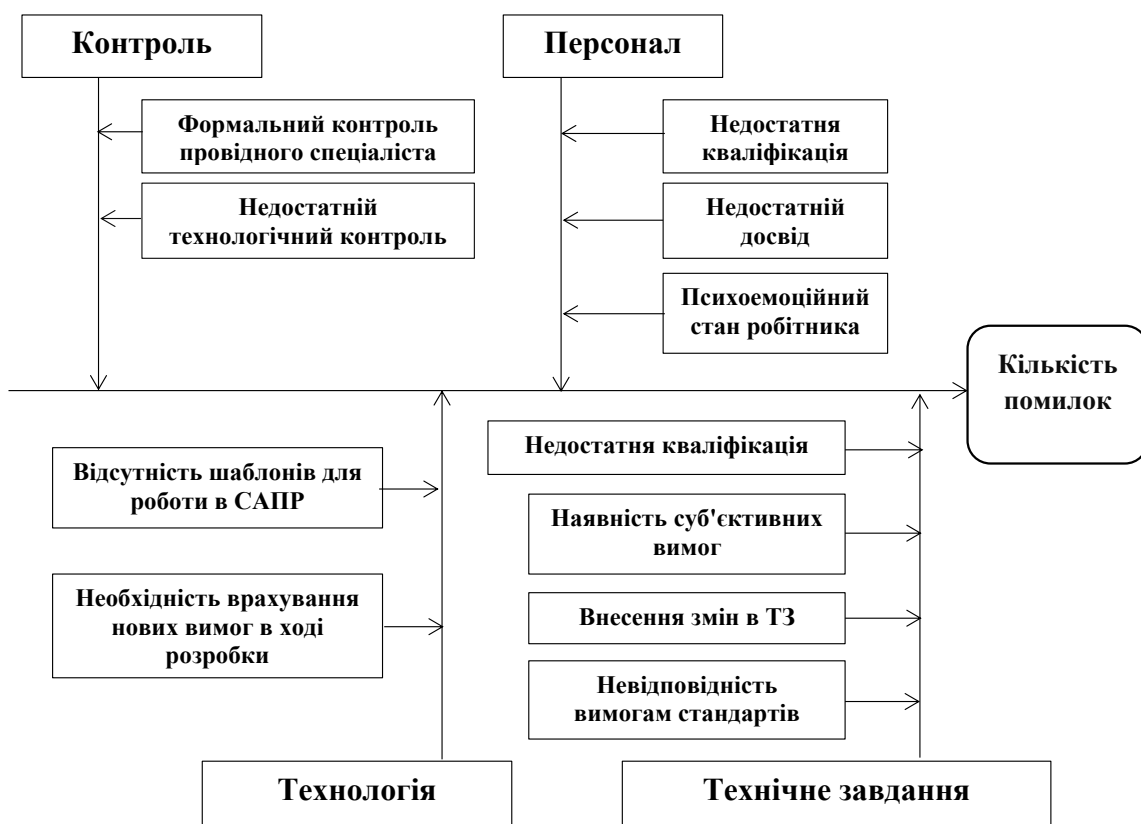


Рис. 2

за метрологічний контроль та нормоконтроль КД відповідають метрологи та нормоконтролери [6, 7, 11].

Рушійною силою при розробці КД є *статистичний аналіз* конструкторських помилок, який дозволяє визначити рівняння зв'язку вхідних і вихідних параметрів, проаналізувати параметри технологічного процесу, побудувати математичну модель процесу, або, іншими словами, встановити взаємну залежність між різними факторами і технологічними результатами процесу. За результа-

тами статистичного аналізу причин появи помилок розробляються заходи щодо управління, направлені на підвищення якості розробки КД на підприємстві а саме: проведення семінарів по роботі з програмами автоматизованого проектування Solid Works і SWR-специфікація; укладання або подовження договорів про забезпечення необхідною нормативною документацією; навчання персоналу у зовнішніх організаціях (наприклад, навчання по роботі з програмами для виконання розрахунків тощо); щотижневі наради колек-

тиву щодо обговорення допущених помилок; затвердження внутрішніх правил розробки КД і розробки внутрішніх стандартів організації; розробки шаблонів технічних вимог в Solid Works; передача досвіду новим співробітникам.

За допомогою САПР можна значно підвищити якість і продуктивність робіт та скоротити час на проведення нормоконтролю [15]. Відповідно скоротяться і строки проектування, так як зміни в стандартах швидко коригуються системою. Всі ці фактори дозволять швидко перевірити і оцінити різні варіанти проектних рішень, змінити та підвищити якісні характеристики виробу. Аналіз причин і наслідків виникнення невідповідностей при розробці і проектуванні виробів на підприємстві показано на рисунку 2.

Висновки При оцінюванні впливу конструкторських помилок необхідно розглядати конструкцію виробу у нерозривному зв'язку з її цільовим призначенням і застосуванням. Аналіз показав, що помилки мають відносний характер, який

залежить не тільки від об'єктивних факторів, але й від досвіду і кваліфікації розробника, провідного фахівця (експерта), який визначає помилку. Вироби розроблені для виготовлення в одиничному виробництві будуть помилковими для серійного виробництва і навпаки. Дуже важко оцінити помилки економічного характеру, а помилки соціального характеру виявляються тільки після певного періоду експлуатації.

Отже знання розробником причин виникнення основних видів конструкторських помилок дозволяє ціле-направлено їх уникати. Конструктор у своїх розробках повинен визначити певний стиль і порядок роботи, щоб максимально їх не допустити. Потужним важелем покращення якості проектування і усунення всякого роду помилок є застосування САПР, яка виключає участь в цьому процесі людини, яка може помилятися. Безпомилково створений і відпрацьований алгоритм автоматичного проектування є надійним підґрунтям виробництва якісної продукції.

Список літератури:

1. ГОСТ 2.111-68 Єдина система конструкторської документації. Нормоконтроль (недійсний в Україні, використовується як довідковий)
2. ДСТУ ГОСТ 3.1116:2014 Єдина система технологічної документації. Нормоконтроль (ГОСТ 3.1116-2011, IDT)
3. ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю ВИМОГИ. (ISO 9001:2015, IDT)
4. О.П. Морозенко, Г.В. Малишко Правила виконання та оформлення креслень URL https://nmetau.edu.ua/navch_posibnik_ch.1.pdf (дата звернення 12.12.2024)
5. Є.А. Антонович, Я.В. Василишин, В.А. Шпільчак. Креслення: Навч. посібник/ За ред. проф. Є.А. Антоновича. – Львів: Світ, 2006. – 512 с
6. Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII «Про метрологію та метрологічну діяльність».
7. ГОСТ 2.111-68 (1995) – ЕСКД. Нормоконтроль. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/gost/13-1-0-965> (дата звернення: 12.12.2024).
8. В.П. Шпачук Основи механіки деформівного тіла. Цифровий репозиторий ХНУГХ ім. А.Н. Бекетова URL <http://eprints.kname.edu.ua> > (дата звернення 17.12.2024)
9. Ю.С. Рудь Основи конструювання машин. URL <https://lib.iitta.gov.ua> > eprint > (дата звернення 18.12.2024)
10. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: підручник. – Львів: Афіша, 2003. – 560 с. 26. URL <https://elib.lntu.edu.ua> > elib_upload > (дата звернення 18.12.2024)
11. Нормоконтроль технічної документації StudFiles URL <https://studfile.net> > preview > page:6 (дата звернення 23.12.2024)
12. О.В. Дерібо, С.В. Репінський. Розмірно-точнісне моделювання конструкцій та технологічних процесів : електронний навчальний посібник Вінниця : ВНТУ, 2024. – 105 с. URL <http://pdf.lib.vntu.edu.ua> > (дата звернення 23.12.2024).
13. В.В. Багрій, С.К. Мещанінов, О.М.С'янов Основи проектування електронних систем URL <https://www.dstu.dp.ua> > Portal > (дата звернення 24.12.2024).
14. К. С. Барандич, С. П. Вислоух, М. В. Філіппова. САПР ТП. URL <https://ela.kpi.ua> > bitstream > (дата звернення 24.12.2024).
15. Мороз_Пристапа. Створення і використання технічних систем URL <https://elib.lntu.edu.ua> > page10 (дата звернення 24.12.2024).

Pavlenko V.Ya. MANAGEMENT OF THE DESIGN DOCUMENTATION DEVELOPMENT PROCESS – A RELIABLE FOUNDATION FOR THE PRODUCTION OF QUALITY AND COMPETITIVE PRODUCTS IN THE MODERN ORGANIZATION

In order to achieve the best result of the enterprise of any form of ownership, it is necessary to pay attention to increasing competitiveness, to the performance of quality indicators at all stages of the life cycle of production of products. The quality of any product is ensured both in the manufacturing process and at the stage of its development. A set of design documentation for a product is the result of the development or design process [1, 2]. Competently developed construction documentation allows you to get all the necessary information about the future product: its design, dimensions, weight, manufacturing methods and necessary materials; requirements of normative documents; the need for control or expertise; features of operation. One of the ways to assess the quality of the development and design process is the number of errors made in the design process. According to statistical analysis, 60–90% of finished products fail due to design errors. Most of them are found in the process of manufacturing and the first test of the product, and the other part only in the process of operation for some time, which shortens the inter-repair process of the product and the resource of its work as a whole. Based on this, the preparation and organization of the production of products of high stable quality, as well as the operation and repair of the finished product depends on the quality of the construction documentation development process.

The article discusses practical recommendations for improving the management of the construction documentation development process at a modern enterprise. The design errors were analysed and the tasks of improving the quality of the development of construction documentation were outlined due to the implementation of measures that allow to reduce their number; and also reduce the labor intensity of regulatory operations. The advantages of using statistical methods of analysis at the enterprise with the use of an automated design and calculation system have been determined, which is designed to automate the technological process of product design.

Key words: design documentation, design error; technical documentation, statistical control.

Фомін О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Козинка О.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

Турпак С.М.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Васильєва Л.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Красулін О.С.

Приазовський державний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ КОНЦЕПТИ КУЗОВІВ НАПІВВАГОНІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЗАХИСНИХ АНТИВІБРАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

В цій статті розглянуто використання нових матеріалів та лакофарбових матеріалів, які відіграють особливу роль в машинобудуванні, авіабудуванні та суднобудуванні: захист від корозії та механічних коливань, які значно впливають на міцність та довговічність конструкцій. Перспективних моделей кузова напіввагону з нових матеріалів та застосування захисних покриттів для покращення техніко-економічних показників. Антикорозійні покриття відіграють важливу роль у захисті металевих поверхонь від корозії, запобігаючи їх руйнуванню та продовжуючи термін експлуатації. Корозійна стійкість залежить від природи металу. Природний клімат та хімічне середовище загрожують металоконструкціям, піддаючи їх окисленню, метал поступово втрачає свою міцність та естетичний вигляд. Засоби антикорозійного захисту давно та успішно продовжують термін експлуатації металу. Варто застосовувати антикорозійне покриття, наносити на поверхню і не дати корозії нашкодити металу. Поверхневий захист металу може бути виконаний його фарбуванням або нанесенням поверхневих плівок, за своїм складом нейтральних до дії кисню. Нанесення лакофарбових матеріалів дозволяє створити на металевій поверхні плівку, яка захищає матеріал від зовнішніх впливів, у тому числі корозії, що провокують. Правильна обробка поверхні, що фарбується – один з головних факторів у забезпеченні довговічності всього лакофарбового покриття. В цій роботі було розглянуто авіаційну промисловість. Найбільш негативний вплив для конструкцій літака може мати вібрація газотурбінного двигуна. У конструкціях високий рівень вібрації може спричинити тріщини, ослаблення болтів, сильний шум або навіть поломку. Спричинити пошкодження конструкції, експлуатаційну надійність: погіршити несучу здатність. Розглянуті основні методи боротьби з вібрацією. Під час будівництва та проектування повітряних суден останнього покоління використовується все більше нових матеріалів, які покращають техніко-економічні показники. Розглянули поліуретанову емаль (рідкий пластик), як комплексне покриття, що захищає металеві поверхні від корозії. Обробка металевих поверхонь є конструктивним захистом, без якого не обійтися, оскільки корозія може негативно позначатися на довговічності та безпеці конструкції.

Ключові слова: машинобудування, транспорт, авіація, суднобудування, рухомий склад, кузов напіввагона, захисне покриття, нові матеріали, експлуатація, надійність.

Постановка проблеми. В даний час на залізничному транспорті все більше уваги приділяється забезпеченню високого рівня експлуатаційної надійності рухомого складу та безпеки руху поїздів, що є найважливішою умовою підвищення ефективності та якості роботи

залізничного транспорту [1, с. 220]. Економічні показники в оцінці надійності дуже важливі, оскільки підвищення рівня надійності в машинобудуванні, з одного боку, пов'язані з додатковими матеріальними витратами, з другого – зі зменшенням витрат з їхнього ремонту і обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [2, с. 35] досліджували механізм корозії в хлорованому водному середовищі на зразках низьколегованих чорних матеріалів, покритих дуплексним покриттям, що складається з цинку, напиленого дуговим способом. Шар і бітумну фарбу, що виконує роль ущільнювача. Для аналізу впливу механічного пошкодження на захисну дію дуплексного покриття були зроблені канавки, що виявляють оголене залізо. Таким чином електрохімічним та фізико-хімічним шляхом досліджено самовідновлення канавок продуктами корозії. Результати, отримані за допомогою електрохімічних методів, показали не тільки важливість катодного захисту, досягнутого присутністю цинку (розвиток корозійного потенціалу), а також вплив ущільнювального покриття (вимірювання імпедансної спектроскопії), що уповільнює проникнення електроліту в металеву поверхню і таким чином обмеження корозії (фізичний бар'єр і електричний опір).

В роботі [3, с. 129] було обґрунтовано, що для підвищення експлуатаційних характеристик деталей транспортних засобів, у тому числі і їх антикорозійних властивостей та зносостійкості, доцільно використовувати захисні полімерні композиційні покриття.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз нових матеріалів та лакофарбових матеріалів, які відіграють особливу роль в машинобудуванні, авіабудуванні та суднобудуванні: захист від корозії та механічних коливань, які значно впливають на міцність та довговічність конструкцій. Перспективних моделей кузова напіввагону з нових матеріалів та застосування захисних покриттів для покращення техніко-економічних показників. Для досягнення поставленої мети, треба виконати ряд завдань: основні методи захисту та боротьби з вібрацією; вплив полімерних матеріалів в авіабудівній промисловості; антикорозійне покриття в суднобудуванні.

Виклад основного матеріалу. Авіаційна промисловість – галузь машинобудування. Авіаційна промисловість є одним із пріоритетних напрямків розвитку сучасної української економіки, тому необхідна державна підтримка галузі. За цей час в Україні встигла сформуватись нова галузь малого авіабудування [4, с. 242]. Українські приватні конструктори та компанії успішно проектують, виробляють та продають майже дві сотні ультралегких літаків на рік, які літають по всьому світу.

Забезпечення безпеки польотів авіації завжди було важливим державним завданням, за допо-

могою якої виключався ризик загибелі людей та заподіяння шкоди державному майну. Був проведений аналіз [5, с. 123; 6, с. 83] можливих станів паливної системи з урахуванням впливу різних експлуатаційних факторів показав, що найбільш негативний вплив може мати вібрація газотурбінного двигуна. Вібрація не тільки виснажує пасажирів та льотчиків, але й завдає шкоди авіоніці та комплектуючим літального апарату, знижуючи їх надійність та термін служби експлуатації.

У конструкціях високий рівень вібрації може спричинити тріщини, ослаблення болтів, сильний шум або навіть поломку [7, с. 68]. Спричинити пошкодження конструкції, експлуатаційну надійність: погіршити несучу здатність. Ознаками зниження експлуатаційної надійності є поява тріщин у несучих конструкціях.

Авіаційний двигун викликає вібрацію всіх частин літака, яка негативно позначається на роботі приладів, спотворюючи їх показання та скорочуючи термін служби. На практиці у разі вібрації крил літака, споруд резонанс призводить до утворення коливань з великими амплітудами, при яких виникають напруги, що перевищують допустимі з точки зору міцності, що, звичайно, є не тільки небажаним, а й небезпечним.

Основними методами боротьби з вібрацією є:

- зменшення вібрації у джерелі їх виникнення: удосконалення конструкції (розрахунок фундаменту, системи амортизаторів чи віброізоляторів);
- конструктивні методи (віброгасіння, вібродефнування – підбір певних видів матеріалів, віброізоляція).

Основні методи захисту від вібрації машин та обладнання:

- зниження вібрації за допомогою зниження або ліквідації збурювальних сил;
- відбудова від режиму резонансу, вибираючи раціональну масу або жорсткості системи, що коливається;
- вібродефнування (збільшення опору коливальної системи);
- динамічне гасіння коливань;
- підвищення жорсткості системи за допомогою будівельних конструкцій (віброізоляція, віброгасіння).

Віброгасіння – це метод зниження вібрації шляхом перетворення енергії механічних коливань системи теплову енергію. За допомогою:

- використання як матеріали конструкції матеріали з великим внутрішнім тертям;
- нанесення на вібруючі поверхні шару пружних матеріалів (гума, пінопласт тощо);

– переведення механічної енергії в енергію струмів Фуко.

Динамічне гасіння здійснюється шляхом встановлення агрегатів на масивні фундаменти або перекриття, які вібрують разом з основними агрегатами та за рахунок появи резонансу вібрація гаситься.

Відбудова від резонансу здійснюється з допомогою виключення резонансних режимів роботи, тобто. відбудова власних частот від частоти збуджуючої сили. На частотах нижче резонансної повний опір системи виявляється рівним пружному опору, отже, цих частотах система надає пружний опір.

Віброізоляція – метод, що знижує вібрацію, що впливає, на шляхах її поширення. Метод полягає у встановленні джерела коливальних на амортизатори, що знижують передачу коливальної енергії об'єкту, що захищається.

Метод вібродемпфування полягає у зниженні вібрації шляхом перетворення енергії механічних коливальних даної системи, що коливається, в теплову енергію. Великим загасанням коливальних мають сплави марганцю з вмістом 20% міді та магнієві сплави. Для вібродемпфування можуть використовуватися композиційні та мастильні матеріали [8, с. 89]. На рисунку 1 ми запропонуємо перспективну концепцію кузова вантажного напіввагону з модульним покриттям з полівінілхлориду.

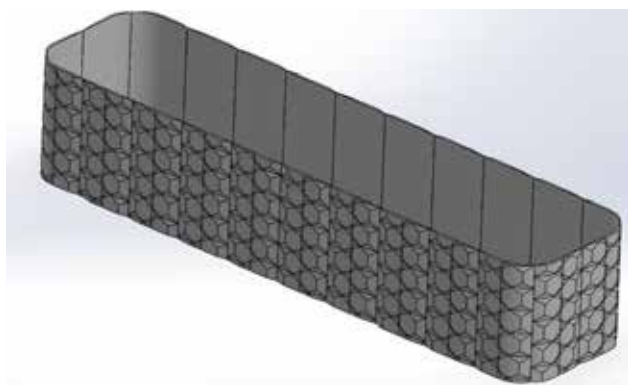


Рис. 1. Перспективна концепція кузова вантажного напіввагону з модульним покриттям з полівінілхлориду

Під час будівництва та проектування повітряних суден останнього покоління використовується все більше нових матеріалів. Глобальний пасажиропотік зростає, ціни на авіаквитки знижуються, авіакомпанії намагаються скоротити експлуатаційні витрати, в тому числі за рахунок зниження маси повітряних суден. Фахівці оціню-

ють поточну ємність ринку полімерів в авіабудуванні 8,17 мільярда доларів США.

Ще в 1950-х роках минулого століття конструктори спробували застосувати склопластик для обшивки передньої частини авіаційних двигунів. Вони середньому нагріваються від 100 до 300 °С. Згодом армовані пластики використовувалися при виготовленні корпусів літаків «Боїнг-747», створених на основі склопластиків, просочених поліімідом [9, с. 1315]. Основний недолік склопластиків, що полягає в їх низькій питомій жорсткості, був подоланий у нових композитах – вуглеродопластиках і боропластиках.

Лакофарбові матеріали відіграють особливу роль в авіабудуванні: захист від атмосферних впливів та агресивних середовищ, морозостійкість, гасіння вібрації, терморегуляція та інші. Наприклад, фарба на основі пластифікованих поліуретанів дає обшивці літака морозостійкість від мінус 40 до мінус 60 °С, поліакриловий лак – взагалі до мінус 100 °С.

Найбільш активно полімери сьогодні застосовують при створенні літальних апаратів для малої авіації. Легкі, дво-, чотиримісні літаки або гелікоптери, тут частка композиційних матеріалів може досягати 80 відсотків від маси літального апарату. Це зумовлено, по-перше, вартістю виготовлення такого літального апарату, по-друге, його льотними властивостями. Приклад – літаки австрійської фірми Даймонд, німецькі Extra, Extrime. Багато світових виробників літальних апаратів такого типу перейшли на застосування полімерних композитних матеріалів.

Полімери характеризуються легкістю, різноманітністю складу та широким діапазоном технічних властивостей, що дозволяє широко використовувати їх в авіабудуванні. Деталі, виготовлені на основі полімерних матеріалів, у середньому на третину легші за металеві аналоги при однаковій міцності.

Вартість полімерної сировини поки що вища, ніж металевих аналогів. Це зумовлено складною технологією виробництва полімерів. Проте економія витрат за обробку, складання, і навіть зниження витрат за транспортування дозволяють істотно знизити ціни готові компоненти, що робить застосування полімерів в авіабудуванні економічно ефективним. Наприклад, при виробленні деталей літака з алюмінієвої або іншої металевої сировини у відходи і зворотну переробку йде до 90 відсотків матеріалу, в той час як виготовлення полімерної деталі, порівнянної за характеристиками, не залишає відходів і дозволяє отримати деталь в заданих параметрах.

У металів є поняття «старіння», є втомна міцність, у вуглепластику, при належному виготовленні цього бути не повинно. Насправді це виглядає так: у металевого літака ресурс по «крилу» може бути від 10 до 25 років. Потім на такому літаку літати вже небезпечно, і його продають у «треті країни». У композитного крила ресурс закладається від 50 років. Застосування вуглепластиків поки що не найдешевше задоволення. Але завдяки падінню ціни та розвитку технологій воно вже стало економічно вигідним. Хоча ще п'ятнадцять років тому це було негаразд. Композити коштують, як правило, дорожче за метали. Але це дуже залежить від того, що робити, з чого, за якою технологією. Нові матеріали стали невід'ємними елементами загальної інноваційної екосистеми авіабудування.

Суднобудування – галузь важкої промисловості, що здійснює будівництво суден. є одним із найкращих виробників фарби та антикорозійних матеріалів в Україні.

Антикорозійний захист – спеціальне покриття, що утворює шар захисної плівки на металевій поверхні. Основа захисту складається з органічних та неорганічних матеріалів, в основному це чисті метали, їх сплави та лакофарбові продукти. Антикорозійні матеріали застосовуються з урахуванням складу металевих матеріалів, його призначення та експлуатаційних особливостей. Найбільш доступним способом захисту вважаються антикорозійна фарба та спеціальна емаль завдяки цілому ряду переваг: простота застосування, економічність при нанесенні, палітра всіляких кольорів, стійкість до цвілі та грибка, екологічність, досить низька вартість. У свою чергу антикорозійна фарба має спеціально розроблений склад і розподіляється на декілька критеріїв: кислотостійка фарба, лугостійка фарба, антикорозійна фарба, спеціальні емалі, антикорозійна ґрунтовка.

Антикорозійне покриття, а також антивібраційне – поліуретанова емаль (рідкий пластик). Як комплексне покриття, що захищає металеві поверхні від корозії та вібрації. Для отримання лакофарбового покриття, що характеризується хімічною стійкістю, яке захищає різні поверхні від впливу середовищ кислотного, а також лужного характеру та сольових розчинів, агресивних газів. Поліуретанову емаль можна наносити на різні поверхні: оцинковане залізо, чорні метали, алюміній, у тому числі на бетон та дерево. Нанесене покриття поліуретанової емалі можна експлуатувати за температури не нижче -40°C і до $+150^{\circ}\text{C}$.

Поліуретановий литтєвий пластик, в народі званий по простому рідкий пластик, являє собою двокомпонентний матеріал. Легким рухом руки при змішуванні основи та затверджувача компаунд починає твердіти і перетворюється в елегантний пластиковий виріб. На рисунку 1 ми запропонуємо перспективну концепцію кузова вантажного напіввагону з поліуретанового матеріалу. Кузов покритий модульним поліуретановим литтєвим пластиком.



Рис. 2. Перспективна концепція кузова вантажного напіввагону з поліуретанового матеріалу

Властивості поліуретанового литтєвого пластика: Поліуретан являє собою фарбу по металу, яка функціонально об'єднує в собі, захист від корозії та фінішне покриття; Утворює на поверхні нанесення гладку антикорозійну плівку, яка захищає поверхню металу від дії вологи і повітря, утворення іржі; Утворює покриття, стійке до дії води, атмосферних впливів, індустриальних масел, побутових миючих засобів; Фарба має високу адгезію (зчеплення) до основи.

Висновки. 1. Авіаційна промисловість є одним із пріоритетних напрямків розвитку сучасної української економіки. В авіаційній промисловості вібрація негативно позначається на роботі приладів, спотворюючи їх показання та скорочуючи термін служби. В роботі були приведені основні методи боротьби з вібрацією. Дуже перспективна нова галузь малого авіабудування. У 2018 році в українське підприємство-виробник **Аеропракт** випустив рекордну в своїй історії кількість літаків – 96 одиниць, а річний оборот наблизився до 5 млн. євро. Обсяги виробництва Аеропракту – це 5% від річного обсягу світового ринку таких літаків. Загалом за свою історію український виробник випустив 1100 літаків.

Під час будівництва та проектування повітряних суден останнього покоління використовується все більше нових матеріалів. Авіакомпанії нама-

гаються скоротити експлуатаційні витрати, в тому числі за рахунок зниження маси повітряних суден. Фахівці оцінюють поточну ємність ринку полімерів в авіабудуванні 8,17 мільярда доларів США.

2. Аквахім є одним із найкращих виробників фарби та антикорозійних матеріалів в Україні. Антикорозійне покриття в суднобудуванні полі-

уретанова емаль (рідкий пластик). Комплексне покриття, що захищає металеві поверхні від корозії. Поліуретанову емаль можна наносити на різні поверхні: оцинковане залізо, чорні метали, алюміній, у тому числі на бетон та дерево. Нанесене покриття поліуретанової емалі можна експлуатувати за температури не нижче -40°C і до $+150^{\circ}\text{C}$.

Список літератури:

1. Сосунов Н. Н. Підвищення ефективності процесів експлуатації та технічного обслуговування рухомого складу у системі ремонтних підприємств галузі. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Луганск. 2006. С. 219–223.
2. Jing Li et al. Reinforcement of graphene and its derivatives on the anticorrosive properties of waterborne polyurethane coatings. *Composites Science and Technology*. P. 30-37.2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.04.017>
3. Павленко В. М. / та ін. Дослідження методів випробування лакофарбового покриття на стійкість до корозії. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. № 2 (18). С. 127–133. doi: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-127-133>
4. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239–243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487
5. Sergii V. Sagin, Sergii S. Sagin, Oleksij Fomin, Oleksandr Gaichenia, Yurii Zablotskyi, Václav Pištěk, Pavel Kučera. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*. 2024. 120221 ISSN 0960-1481 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>
6. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P. 79–87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
7. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63–71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
8. Павленко В. М. / та ін. Новітні технології в екологічно безпечних полімерних покриттях: дослідження, технології, перспективи. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. № 1 (19). С. 85–94. doi: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-85-94>
9. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Fomin, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. 10, 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>

Fomin O.V., Kozynka O.S., Turpak S.M., Vasilyeva L.O., Krasulin O.S. THE PROSPECTIVE CONCEPTS OF BODY DESIGNS FOR GONDOLA CARS USING NEW MATERIALS AND PROTECTIVE ANTI-VIBRATION COATINGS

This article examines the use of new materials and coatings, which play a crucial role in mechanical engineering, aerospace, and shipbuilding: protection against corrosion and mechanical vibrations, which significantly affect the strength and durability of structures. Prospective models of hopper car bodies made from new materials and the use of protective coatings to improve technical and economic performance are discussed. Anti-corrosion coatings play an important role in protecting metal surfaces from corrosion, preventing their degradation and extending their service life. Corrosion resistance depends on the nature of the metal. The natural climate and chemical environment pose a threat to metal structures, subjecting them to oxidation, which gradually reduces the metal's strength and aesthetic appearance. Anti-corrosion protection methods have long been and continue to be successful in extending the service life of metals. It is important to apply anti-corrosion coatings, ensuring that the metal is protected from the harmful effects of corrosion. Surface protection of metal can be achieved by painting it or applying surface films that are neutral to oxygen exposure. The application of coatings creates a film on the metal surface that protects the material from external influences, including those that provoke corrosion. Proper surface treatment before painting is one of the key factors in ensuring the durability of the entire coating. This work also examines the aviation industry. The most negative impact on aircraft structures can come from the vibration of the gas turbine engine. High

levels of vibration in the structures can cause cracks, bolt loosening, excessive noise, or even breakage. This can lead to structural damage and affect operational reliability, reducing load-bearing capacity. The main methods of vibration control are discussed. During the construction and design of next-generation aircraft, an increasing number of new materials are being used to improve technical and economic performance. Polyurethane enamel (liquid plastic) is discussed as a comprehensive coating that protects metal surfaces from corrosion. Treating metal surfaces is a crucial protective measure, without which the durability and safety of the structure would be compromised, as corrosion can negatively affect both.

Key words: *mechanical engineering, transportation, aviation, shipbuilding, rolling stock, gondola car body, protective coating, new materials, operation, reliability.*

Шорнікова С.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ТЕХНІЧНИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ – ЗАПОРУКА ВИПУСКУ ВИСОКОЯКІСНОЇ ПРОДУКЦІЇ

В сучасних умовах конкурентної боротьби якість продукції є кінцевою ціллю будь-якого виробника і визначає цінність продукції в очах споживача при експлуатуванні. Якість продукції – це багаторівнева, системна категорія, яка відображає здатність організації задовольняти потреби всіх сторін, зацікавлених в її діяльності, досягаючи при цьому стійкого розвитку в постійно мінливих конкурентних умовах. Одна із характерних рис світового ринку – це постійно зростаючі вимоги до якості продукції, яку виробляє підприємство. Тому в умовах конкурентної боротьби успішно розвиватися зможуть тільки ті підприємства, які здійснюють грамотне управління якістю продукції. Рівень якості продукції формується на таких етапах життєвого циклу, як планування, розробка і виготовлення, тому невідповідності не виявлені на цих етапах тягнуть за собою великі збитки. Одним із основних етапів проектування технічної продукції є комплект конструкторської документації (КД) на виріб, який супроводжує його на всіх етапах життєвого циклу: без неї неможливо створення і виготовлення виробу, його використання за призначенням. КД є первинним, а отже найбільш повним і точним носієм інформації технічного рівня та якості виробу. Відповідно, від якості розробки КД залежать правильна підготовка і організація виробництва продукції стабільної якості. Технічний контроль КД полягає у перевірці технічної документації, відповідності дослідного зразка технічному завданню, правилам оформлення, викладеним в ЄСКД (Єдина система конструкторської документації). Для цього передбачений ряд процедур технічного контролю: технологічний, метрологічний, і нормативний контроль (далі нормоконтроль).

На сучасному етапі, у зв'язку з розвитком економіки, сталися суттєві зміни зовнішніх умов: значна кількість національних стандартів переведена в розряд рекомендованих, а робота із зарубіжними замовниками потребує підготовки КД у відповідності з міжнародними стандартами (ISO, API, DIN, EN). Періодично відбуваються внесення змін в стандарти, ускладнюється та стає все більш різноманітною продукція, йдуть процеси конверсії, підприємства впроваджуються в єдиний інформаційний простір і проводити процедуру технічного контролю стає все складніше.

У статті розкрито компоненти системи контролю якості. Окреслено задачі технічного контролю КД на українських підприємствах. Визначено об'єкти контролю, запропоновано організаційні заходи, направлені на вирішення цих задач.

Ключові слова: *якість продукції, технічний контроль, метрологічний контроль, нормативний контроль, система якості.*

Постановка проблеми. На будь-якому сучасному підприємстві оптимальний рівень якості конструкторських розробок забезпечується *технічним контролем*, який включає технологічний, метрологічний та нормоконтроль. Основними задачами *технічного контролю* КД є своєчасне отримання повної та достовірної інформації про якість продукції, стан устаткування і технологічного процесу з метою попередження несправностей та відхилень, які можуть призвести до порушень вимог стандартів і технічних умов. Іншими словами це перевірка відповідності конструкції її функціональному призначенню, правильності виконання розмірів, сполучень, вибору і змісту прийнятих технологічних рішень. Якість техніч-

ної документації контролюється безпосередніми виконавцями і керівниками всіх рівнів у відділах головного конструктора, головного технолога, головного метролога та інших служб підприємства [12]. Нажаль, державні стандарти встановлені для технічного контролю КД не достатньо забезпечені необхідними методичними матеріалами. Практика показує, що підприємства часто порушують технічні завдання та технічні вимоги, неправильно трактують вимоги стандартів – причому дві третини цих порушень безпосередньо впливають на якість кінцевого результату. Тому правильна організація технічного контролю є важливим інструментом забезпечення якості не тільки КД, але й спроектованого виробу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Важливим та обов'язковим процесом на будь-якому підприємстві є контроль продукції яку воно виробляє. Одним із етапів цього процесу є контроль КД. Процесам технічного контролю КД і методам та засобам вимірювання присвячено багато теоретичних і практичних досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених. Дослідженням цих питань займалися такі науковці, як Ванін В.В., Бліок А.В., Гнітецька Г.О., Дубова С.В., Морозенко О.П., Малишко Г.В., Орлов П.А. [1–4]. Автори розглядають оптимальні системи управління контролем, які дозволяють забезпечити виробництво конкурентоспроможного і якісного продукту та встановити контроль якості на всіх етапах виробничого процесу. Але станом на сьогодні значна кількість національних стандартів переведена в розряд рекомендованих, а робота із зарубіжними замовниками потребує підготовки КД у відповідності з міжнародними стандартами, які, на жаль, досить часто мають чисто інформаційний характер. Тому питання контролю КД є актуальним і потребує роз'яснень.

Постановка завдання. Контроль КД являє собою процес, в якому керівництво встановлює можливість досягнення своїх цілей (виготовлення конкурентноздатної продукції), виділяє проблеми і вживає коригувальні заходи перш, ніж підприємству буде завдано серйозної матеріальної шкоди [12]. Завдяки контролю КД, як правило, виявляються похибки в діях певних функцій управління. Отже контроль КД є вираженням функцій обліку та аналізу, а також процедурою усунення помилок в діях на всіх етапах життєвого циклу – планування, розробки, виробництва та експлуатації [2].

Постановка завдання. Метою статті є: всебічне вивчення процесів технічного контролю КД (технологічного, метрологічного, нормативного) і аналіз можливих проблем, які можуть виникнути в результаті цього контролю.

Виклад основного матеріалу Предметом *технічного контролю* є розробка комплексу організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення виробництва продукції із заданим рівнем якості у заданих обсягах. Реалізація технічного контролю передбачає три основних етапи:

- отримання первинної інформації про фактичний стан контрольованого об'єкта, його контрольовані ознаки і показники;
- отримання вторинної інформації – відхилення від заданих параметрів шляхом порівняння первинної інформації із запланованими критеріями, нормами чи вимогами;

- підготовка інформації для вироблення відповідних керувальних впливів на контрольований об'єкт як результат контролю [12].

Таким чином, технічний контроль є складовою частиною процесу управління якістю продукції і здійснюється на всіх стадіях життєвого циклу (розробки, виготовлення, експлуатації і використання).

На *стадії розробки КД* ціллію контролю є забезпечення відповідності якості виробу, який розробляється, вимогам технічного завдання, діючих нормативно-технічних документів і сучасному технічному рівню. Основними задачами контролю якості при розробці виробу є:

- оцінка рівня якості виробу;
- перевірка правильності використання рекомендованих технічних рішень, сучасних науково-технічних досягнень і виконання вимог технічного завдання;
- перевірка виконання вимог стандартів ЄСКД, ЄСТД, ЄСПД, галузевих стандартів та інших нормативних документів;
- отримання повної і достовірної інформації щодо всіх відхилень об'єктів контролю від заданої якості для прийняття відповідних рішень в системі управління якістю.

Як зазначено вище технічний контроль включає технологічний, метрологічний та нормативний контроль.

Технологічний контроль КД проводиться з метою покращення технологічності виробу (зниження його собівартості) і направлений на дотримання встановлених технологічних норм і вимог із урахуванням сучасного рівня даної галузі техніки і способів виготовлення, експлуатації і ремонту. Технологічність виробу забезпечується спільними зусиллями конструктора і технолога. Документація, яка надходить на технологічний контроль повинна бути перевірена розробником і контролером-технологом (перевіряється, як правило, документація як основного так і допоміжного виробництва). Доречно сказати, що відпрацювання конструкції на технологічність і технологічний контроль КД – ланцюги однієї й тієї ж ланки, адже технологічність виробу закладена в конструктиві виконання окремих деталей і вузлів виробу, в їх геометричній формі, властивостях поверхонь, матеріалі, комплектувальних виробках, тощо. Тому усунення помилок і недоліків технологічного характеру потребує значних витрат і, в окремих випадках, викликає суттєву переробку всієї КД. Відповідно, краще уникати помилок і проводити технологічний

контроль одночасно з відпрацюванням конструкції на технологічність не відкладаючи його до повної розробки виробу [6].

Для досягнення кращих результатів відпрацювання на технологічність КД необхідно проводити послідовно і систематично на всіх стадіях розробки, а саме [5]:

- на *стадії технічної пропозиції* перевіряється правильність вибору варіанту конструктивного рішення у відповідності з вимогами технологічності;

- на *стадії ескізного проекту* перевіряється: правильність вибору принципової схеми конструкції, яка забезпечує простоту констрування виробу і технологічність; раціональність конструктивних рішень з точки зору простоти виготовлення; забезпечення спадкоємності конструкції; правильність поділу виробу на складові частини, які забезпечують зручність обслуговування, монтажу і регулювання; встановлення номенклатури основних марок матеріалів і відповідність цих марок встановленому переліку; можливість застосування раціональних методів обробки для найбільш складних деталей;

- на *стадії технічного проекту* перевіряється: можливість проведення складання виробу і його складових частин; зручність і доступність місць збирання; можливість виключення або доведення до мінімуму механічної обробки при складанні; можливість забезпечення необхідної взаємозамінності складальних одиниць і деталей; вибір елементів конструкції складальних одиниць (основних складових частин) з точки зору їх технологічності; оптимальність номенклатури контрольних параметрів а також методів і засобів їх контролю; можливість застосування стандартних методів виконання контролю;

- на стадії розробки *робочої конструкторської документації* (РКД) з'ясовуються наступні питання: технологічність деталей в залежності від технологічності складальних одиниць; технологічність складання як виробу в цілому, так і його складових частин (в тому числі деталей, які, згідно КД, потребують зварювання); технологічність деталей в залежності від способу виготовлення (механічно оброблені, деталі виготовлені методом лиття, штамповані гарячим або холодним методом, термічно оброблені, тощо); можливість розчленування складальної одиниці на складові частини, збирання яких доцільно проводити паралельно; зручність складання та розбирання; можливість зменшення числа і об'єму

операцій, що вимагають припасування¹; перевірка виконання технологічних рекомендацій, які були рекомендовані на попередніх стадіях.

В залежності від об'єму і змісту РКД технологічний контроль може проводитись одним контролером або кількома контролерами, які спеціалізуються на різних видах документації або виробів. З метою покращення контролю виконання пропозицій рекомендованих на попередніх стадіях розробки доцільно залучення одного й того ж технолога.

Документи представлені для контролювання повинні бути комплектними (комплектність повинна відноситись до усіх документів, які розробляються на відповідній стадії розробки) та підписаними в графах «Розробив» і «Перевірив». При відсутності цих підписів, некомплектності або недбалого виконання документації весь матеріал, переданий на перевірку повертається розробнику на доопрацювання.

Метрологічний контроль КД (далі МК) здійснює правильність вибору параметрів виробу, їх допустимі відхилення та вибір засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), які забезпечують ці параметри, іншими словами це перевірка виконання в документації метрологічних положень, правил і норм чітко регламентованих в діючій нормативно-технічній документації. Облік метрологічних положень в КД потребує від виконавця конкретних знань. Бувають випадки, коли розробники КД недостатньо кваліфіковані в питаннях метрологічного забезпечення. В результаті цього в нових розробках часто виникають питання щодо єдності і необхідної точності вимірювань. Для уникнення цієї проблеми рекомендовано залучати кваліфікованих спеціалістів (метрологів). Під *метрологічним забезпеченням* розуміють встановлення і застосування наукових і організаційних основ технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності вимірювань і необхідної точності. Єдність вимірювань – це такий стан вимірювань, при якому результати вимірювань виражені в узаконених одиницях, а похибки вимірювань відомі із заданою вірогідністю [7]. МК охоплює ряд принципових питань, рішення яких покращує якість виробів і забезпечує якість більш економічними шляхами (усуває збитки через неточності в КД). Економічна ефективність якості досягається шляхом застосування оптимальних показників вимірюваних параметрів. Починається МК з визначення параметрів, які підлягають

¹ Припасування це точний взаємний притін деталей, що з'єднуються без зазорів. Припасування відрізняється високою точністю обробки, що необхідно для беззазорного сполучення деталей [6].

контролю. Здійснюється це за допомогою аналізу і визначення впливу і місця кожного параметра як в загальній конструкції так і роботі виробу в цілому. МК вирішує наступні питання:

- розгляд можливостей заміни вимог до якості (при їх наявності) вимогами до фізичних величин²;

- перевірку коректності вираження вимог, які виключають різне їх тлумачення (тобто для вираження технічних вимог використовувати стандартні терміни³). Специфічні терміни, які допускають можливість різного тлумачення, слід визначати або пояснювати при першому їх згадуванні в кожному документі (в дужках, виносках, довідковому додатку). Посилання на відповідний стандарт дозволить тлумачити однозначно технічні вимоги і застосовувати параметри. Метрологічна термінологія визначена [8], а правильність найменування фізичних величин [9];

- аналіз необхідної кількості номенклатури контрольованих параметрів, які забезпечують оптимальну якість виробу⁴;

- розгляд можливості скорочення номенклатури параметрів вимірювання яких дублюється на різних стадіях;

- обґрунтування номенклатури вимірюваних параметрів (перевіряється за допомогою аналізу науково-дослідних робіт попередніх розробок виробів, результатів експериментальних робіт і випробувань дослідних зразків);

- перевірка наявності допустимих відхилень параметрів (розробник встановлює допустимі відхилення виходячи із функціональних і економічних міркувань і з урахуванням можливостей їх практичного виконання⁵).

Рішення метрологічних питань в нових розробках здійснюється під керівництвом працівників метрологічної служби. Безпосередня участь метролога в розробках не обов'язкова і не практикується, але якщо питання метрологічного характеру узгоджуються із спеціалістами-розробниками заздалегідь – це дає хороший результат.

² Наприклад, вимога “Глибокі раковини на обробленій поверхні не допускаються...” – замінити вимогами до розмірів цих раковин і їх кількості на площі; вимога “Кронштейн встановити вертикально...” – замінити на вимоги до кутового відхилення, тощо

³ Наприклад, вимога “Биття валу не більше...” замінити на “Повне радіальне биття поверхні А відносно поверхні В не більше...”

⁴ Пропозиції щодо кількості номенклатури носять характер рекомендацій – облік їх розробником бажаний, але не обов'язковий. Виключення складає документація на ЗВТ і випробувальне обладнання. В цих випадках облік пропозицій метролога є обов'язковим (визначення нових параметрів, які підлягають вимірюванням доцільно внести в КД на ранніх етапах розробки з метою їх використання на подальших стадіях).

⁵ Наприклад, вимога “Відхилення від площинності не допускається...” – не реальна, так як потребує ідеальної площини, тому вимога формулюється як “Відхилення від площинності не більше...”

Якщо МК не виконується як самостійний етап, то він поєднується з нормоконтролем.

МК *технічного завдання* оцінює повноту і чіткість формулювання вимог до параметрів виробу, що розробляється, з точки зору забезпечення можливості їх вимірювань з необхідною точністю в заданих умовах та оцінює обґрунтованість вимог щодо метрологічного забезпечення розробки, виготовлення, випробовувань і експлуатації.

МК *пояснювальної записки і технічного (ескізного) проекту* направлений на наступне:

- обґрунтування номенклатури та норм точності вимірюваних параметрів, із урахуванням заданих вимог, до вірогідності вимірювань;

- обґрунтування і оцінка контролепридатності конструкції (можливість доступу до елементів вимірювань, достатності контрольних точок – гнізд, роз'ємів, тощо);

- обґрунтування рішень щодо розробки методики виконання вимірювання основних параметрів та рішень щодо перевірки вмонтованих засобів вимірювання;

- аналіз повноти і обґрунтованості робіт по метрологічному забезпеченню, які плануються на стадії розробки робочої документації.

МК *технічних умов (ТУ)* направлений на проведення наступних робіт:

- аналіз достатності і раціональності номенклатури вимірюваних параметрів (відповідність технічному завданню (ТЗ), стандартам, тощо);

- оцінка коректності формулювання вимог, достатніх для забезпечення точності вимірювань;

- визначення допустимих рівнів небезпечних і шкідливих факторів, які може створювати виріб, що розробляється;

- перевірка виконання вимог діючих стандартів, регламентованих видів випробувань, правил приймання та перевірка методів контролю (випробування, вимірювання і т.п.);

- аналіз встановлених норм точності, методики випробувань та ін.

МК *програми і методики випробувань* (ПМ) направлений на наступне:

- аналіз раціональності номенклатури параметрів, вимірюваних на приймальних, приймально-здавальних, періодичних випробуваннях і в процесі експлуатації виробів;

- аналіз змісту вимог відповідно вимірюваним параметрам;

- перевірка наявності методики випробування згідно технічних вимог.

При наявності спеціальних засобів вимірювання, які використовуються при проведенні

випробувань, перевіряють факт їх метрологічної повірки або атестації.

При проведенні МК *креслеників* здійснюються наступні операції:

- перевірка коректності текстових вимог до креслень та оцінка достатності номенклатури вимогам кресленика (вимоги до всіх параметрів виробу, які впливають на виконання своїх функцій: розміри, відхилення форми і розташування, параметри шорсткості і твердості поверхонь, товщина покриттів, тощо);

- аналізують раціональність встановленої системи вимог кресленика, що стосуються контролю виробу (в креслениках задаються не тільки безпосередньо вимірювані параметри, а й параметри, що відносяться до технології виготовлення. Ці параметри встановлюють, як правило, технологи в результаті спільної роботи з конструкторами).

Контроль виробів повинен забезпечуватись стандартизованими ЗВТ, і тільки в крайніх випадках – нестандартизованими (якщо для контролю виробів використовуються нестандартизовані ЗВТ, то перевіряють наявність і зміст технічного опису, інструкції щодо експлуатування, паспорта, інструкції щодо повірки (атестації) на ці ЗВТ).

При проведенні МК *робочої технологічної документації* перевіряється: – коректність вираження вимог до параметрів, які підлягають контролю;

- оцінка раціональності номенклатури вимірюваних параметрів;

- перевірка наявності норм точності вимірювань;

- встановлення наявності методик контролю на всі вимоги ТД;

- перевірка повноти і правильності вимог до ЗВТ;

- оцінка відповідності показників точності вимірювань заданим вимогам (можливість розширення допуску на відповідний параметр спільно з розробником).

Нормоконтроль є окремим видом контролю, якому підлягає вся (без виключення) КД: кресленики усіх видів, схеми, відомості і специфікації, текстові документи на ін. Це обов'язковий контроль, який є завершальним етапом розробки, після чого документація може буди здана у виробництво (для виготовлення), а оригінал – в технічний архів. Рекомендовано проводити його в два етапи: I етап – перевірка оригіналів КД; II етап – перевірка оригіналів з наявністю підписів осіб, відповідальних за виконання і зміст КД, за виключенням підпису керівника організації або підприємства.

Нормоконтроль КД забезпечує дотримання в КД норм і вимог, встановлених стандартами і іншими нормативно-технічними документами. Згідно [10], [11], нормоконтроль повинен бути направлений на забезпечення наступних вимог:

- дотримання у виробках, що розробляються, норм і вимог, встановлених в стандартах, технічних умовах, керівних документах, тощо;

- правильність виконання КД у відповідності з вимогами стандартів ЄСКД (оскільки дотримання норм і правил ЄСКД забезпечує ясну і чітку передачу інформації креслениками та іншими конструкторськими документами і виключає необхідність додаткових роз'яснень);

- досягнення у виробках, що розробляються, високого рівня стандартизації і уніфікації на підставі широкого використання раніше спроектованих, освоєних у виробництві і стандартизованих виробів, типових конструкторських рішень і виконань. Використання їх у розробках скорочує час проектування і покращує якість проекту на надійність за рахунок застосування перевірених деталей та механізмів;

- раціональне використання встановленої обмежувальної номенклатури стандартизованих виробів, конструкторських норм (різьби, діаметрів з'єднань, моделей зубчастих коліс, допусків та посадок), марок матеріалів, профілів і розмірів прокату та ін. Дотримання обмежувальної номенклатури прискорює розробку конструкції і робить її виготовлення більш економічною. З цією метою підприємства, які мають на меті запустити вироби по запозиченій документації, мають право проводити нормоконтроль цієї документації.

КД повинна надаватися на нормоконтроль комплектно, із додаванням креслеників запозичених виробів і креслеників стандартних виробів, які підлягають виготовленню на підприємстві і на які немає підготовленого (відпрацьованого) виробництва. Нормоконтролер має право повернути КД без її розгляду у випадку порушення встановленої комплектності, а також при відсутності обов'язкових підписів або недбалого виконання. Свої зауваження він коротко викладає в переліку, а в документах наносить олівцем умовні позначки в місцях, які повинні бути виправлені або замінені.

Висновки. Технічний контроль КД гарантує, що розробник надає якісний продукт, виявляючи та виправляючи будь-які недоліки в процесі його створення і включає в себе перевірку документації на різних етапах виробництва з метою гаран-

тування того, що продукція відповідає бажаній якості. Якісна продукція повинна задовольняти потреби, очікування і вимоги замовника без помилок і невідповідностей. Таким чином технічний контроль КД має на меті: по-перше – покращення якості продукції та зниження ризиків;

по-друге – підвищення ефективності виробництва; по-третє – залучення нових клієнтів. Ці три мети є запорукою випуску конкурентноздатної продукції.

Список літератури:

1. Ванін В.В., Бліук А.В., Гнітецька Г.О. Оформлення конструкторської документації. Навчальний посібник. – К.: «Каравела», 2003. – 160 с. URL: <https://geometry.kpi.ua> › Vanin_Gniteckaja_kd1_2 (дата звернення: 17.01.2025).
2. Дубова С. В. Науково-технічна документація: Методичні рекомендації до вивчення дисципліни. / С. В. Дубова. – К.: Центральноукраїнський національний технічний університет й 2017, 54с URL: <https://surl.li/hoxqv> (дата звернення: 17.01.2025)
3. Морозенко О.П., Малишко Г.В. Правила виконання та оформлення креслень: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. – 49с. URL :<https://nmetau.edu.ua> › navch._posibnik_ch.2.pdf (дата звернення: 15.01.2025)
4. Орлов П. А. Впровадження систем управління якістю: стан, проблеми, перспективи / П. А. Орлов // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2013. – № 6. – С. 59-63 URL: <https://elib.lntu.edu.ua> › files › elib_upload › (дата звернення: 13.01.2025)
5. ДСТУ 3974-2000 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення
6. ДСТУ 3321:2003 Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять.
7. ДСТУ 2682-94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологічне забезпечення.
8. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення.
9. ДСТУ 3651.0-97 Основні одиниці фізичних величин міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення.
10. ГОСТ 2.111-68 (1995) – ЕСКД. Нормоконтроль. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/gost/13-1-0-965> (дата звернення: 13.11.2024).
11. ДСТУ ГОСТ 3.1116:2014 Єдина система технологічної документації. Нормоконтроль.
12. Види і методи технічного контролю якості продукції. Луцький національний технічний університет URL: <https://elib.lntu.edu.ua> › sites › files › elib_upload › page6 (дата звернення: 10.01.2025).

Shornikova S.V. TECHNICAL CONTROL OF DESIGN DOCUMENTATION IS THE KEY TO THE PRODUCTION OF HIGH-QUALITY PRODUCTS

In modern conditions of competition, product quality is the ultimate goal of any manufacturer and determines the value of products in the eyes of the consumer during operation. Product quality is a multi-level, systemic category that reflects the organization's ability to satisfy the needs of all parties interested in its activities, while achieving sustainable development in constantly changing competitive conditions. One of the characteristic features of the world market is the ever-increasing requirements for the quality of products produced by the company. Therefore, in the conditions of competitive struggle, only those enterprises that carry out competent management of product quality will be able to develop successfully. The level of product quality is formed at such stages of the life cycle as planning, development and manufacturing, therefore inconsistencies not detected at these stages entail large losses. One of the main stages of technical product design is a set of design documentation (DD) for the product, which accompanies it at all stages of the life cycle: without it, the creation and manufacture of the product, its intended use, is impossible. DD is the primary, and therefore the most complete and accurate carrier of information on the technical level and quality of the product. Accordingly, the proper preparation and organization of the production of products of stable quality depend on the quality of the development of the DD. The technical control of the DD consists in checking the technical documentation, the compliance of the experimental sample with the technical task, the design rules set forth in the UDDS (Uniform Design Documentation System). For this, a number of technical control procedures are provided: technological, metrological, and normative control.

At the current stage, in connection with the development of the economy, there have been significant changes in external conditions: a significant number of national standards have been transferred to the category of recommended, and work with foreign customers requires the preparation of DD in accordance with international standards (ISO, API, DIN, EN).

Periodically, changes are made to the standards, products become more complicated and diverse, conversion processes are underway, enterprises are integrated into a single information space, and the technical control procedure is becoming more and more difficult.

The article describes the components of the quality control system. The tasks of technical control of DD at Ukrainian enterprises are outlined. Objects of control are defined, organizational measures aimed at solving these problems are proposed.

Key words: *product quality, technical control, metrological control, regulatory control, quality system.*

ПРИЛАДИ

УДК 535.4;621.373

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/05>

Доля Г.М.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Романюк В.А.

Національна академія Національної гвардії України

Стародубцев С.О.

Національна академія Національної гвардії України

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛАЗЕРНОГО РЕТРОРЕФЛЕКТИВНОГО ДАТЧИКА РАНЬОГО ВІЯВЛЕННЯ ЗАГОРЯНЬ В УМОВАХ ПЕРЕШКОД

Стаття присвячена аналізу ефективності лазерного датчика на основі ретрорефлектора для раннього виявлення займання в середовищі, що має зовнішні завади.

В Україні з початком агресивної повномасштабної війни, яку розпочала Росія, різко зросла кількість пожеж. Це наслідок бомбардувань і обстрілів, які здійснює агресор по критичній і цивільній інфраструктурі, адміністративних, навчальних об'єктах. В зв'язку з цим виникає необхідність щодо підвищення рівня захищеності об'єктів; скоротити час з моменту початку пожежі до подачі датчиком задимленості сигналу, зменшити вплив сторонніх факторів на достовірність сигналу про початок пожежі. Такими факторами на поточний час є потужні вибухи, які в свою чергу визивають високоенергетичні звукові хвилі, вібрації будівель, яскраві спалахи. Як наслідок, під час вибухів пожежа може і не початися, а система пожежної сигналізації буде видавати сигнал про початок загоряння. Системи пожежної сигналізації, які використовуються в Україні, потребують модернізації шляхом покращення надійності і захисту від видачі хибного повідомлення.

Запропоновано методологію оцінки ефективності лазерного датчика для раннього виявлення займання в шумному середовищі на основі теорії статистичного прийняття рішень, критерію Неймана-Пірсона та аналізу кривих детектування. Показано, що для лазерного датчика раннього виявлення загорянь в шумному середовищі порогову потужність сигналу можна розглядати як важливий показник для виявлення джерела пожежі із заданими ймовірностями правильного виявлення та хибної тривоги. Запропоновано спосіб зниження рівня завад, створюваних вібрацією та зміщенням датчика, за рахунок використання двох приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), ПЗЗ – матриць.

Обговорюється експеримент, який підтверджує запропонований підхід. Показано, що вібраційні завади в такій схемі нівелюються, а корисні сигнали підсумовуються. Експериментально показана можливість зменшення інтерференційної складової, що означає таке ж зниження порогової потужності сигналу. Показано, що запропонований метод компенсації перешкод дуже ефективний для раннього виявлення пожеж.

Ключові слова: лазерний датчик, лазерна пляма, світловідбивач, виявлення пожежі, порогова потужність, вібраційні завади.

Постановка проблеми. Вдосконалення системи протипожежної безпеки є актуальною для будь-якої держави, і Україна не є винятком. Щороку в Україні виникало в середньому до 50 тис. пожеж, в яких гинула значна кількість людей і наносились відчутні матеріальні збитки. З початком повномасштабної війни ця проблема тільки загострилась. Протягом 2023 року за оперативними даними внаслідок цієї війни заги-

нуло 10 тис. 158 цивільних осіб (з них 570 дітей), 18 тис. 945 цивільних поранені (з них 1235 дітей). Окупантами зруйновано та пошкоджено понад 214 тисяч об'єктів інфраструктури, зокрема: 8 тис. 642 об'єкти життєзабезпечення, 1 тис. 592 об'єкти транспортної інфраструктури, 3 тис. 679 закладів освіти, 1 тис. 569 закладів охорони здоров'я, 185 тис. 392 житлових будинки, 889 адміністративних будівель. Пожежі, які виникають внаслідок

док обстрілів і бомбардувань, наносять значну частину збитків і людських втрат [1, с. 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Характерною рисою сучасного науково-технічного прогресу є широке використання лазерних датчиків різного призначення. Відомі їх застосування для дослідження атмосфери землі, океану, промислові та технічні застосування [2, с. 28-29; 3, с. 124].

Функціонування таких датчиків полягає в опроміненні об'єкта дослідження і подальшому аналізі прийнятого випромінювання. Досить часто на опромінюваний об'єкт наносять світловідбиваюче покриття (ретрорефлектор), що істотно збільшує потужність сигналу, який приймають, а отже, і точність вимірювань, які проводяться [4, с. 3-4; 5, с. 109; 6, с. 5]. В якості такого покриття можуть бути використані плівки з просторовою решіткою мініатюрних тетраедричних світловідбивачів або хаотично розташованою сукупністю мікроскокульок. У першому випадку спостережувана картина в площині приймання являє собою сукупність локальних максимумів інтенсивності, регулярно розташованих у просторі. У другому випадку спостерігається спекл-картина, що являє собою хаотично розташовану в просторі сукупність окремих світлових плям (спеклів).

У разі зміни в просторі положення об'єкта з нанесеним на його поверхню ретрорефлектором, його вібрації, поступальному або обертовому русі або у разі зміни властивостей середовища поширення, спостерігаються адекватні динамічні зміни просторового положення локальних максимумів.

Цю обставину покладено в основу принципу роботи датчиків зміни стану атмосфери, зумовленого або регулярними флуктуаціями густини середовища (акустичні коливання) [5, с. 110], або хаотичними змінами густини повітря завдяки спалахам у приміщеннях, що створюють турбулентні

збурення [6, с. 5]. Такі динамічні зміни положення локальних максимумів фіксуються за допомогою ПЗЗ матриці.

Найважливішим параметром таких датчиків є ефективність їхньої роботи, оцінювана за певним критерієм [6, с. 110].

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз ефективності функціонування лазерного датчика раннього виявлення загорянь (ЛДРВЗ) в різних умовах роботи.

Виклад основного матеріалу. Спрощену схему ЛДРВЗ представлено на рис. 1. Вона містить лазер 1, світлоділник 2, ділянку з тепловими збуреннями, що змінюють ступінь турбулентності повітря 3, ретрорефлектор 4, ПЗЗ матрицю 5. Під час опромінення ретрорефлектора на основі мікроскокульок у площині приймання, де розташована ПЗЗ матриця, формується спекла картина, зображена на рис. 2а.

У разі виникнення області турбулентності на трасі поширення променя локальні максимуми починають зміщуватися хаотичним чином, причому амплітуда відхилення довільного локального максимуму відносно його незворушного положення зростає зі зростанням ступеня турбулентності.

Випадкові відхилення відносно незворушного положення мають нормальний закон розподілу, а дисперсія флуктуацій для колімованого променя залежить від параметрів турбулентної траси наступним чином [7, с. 140]:

$$\sigma_{\alpha,\beta}^2 = 3,28 C_n^2 L L_0^{-1/3}, \quad (1)$$

де C_n^2 – структурна постійна флуктуацій показника заломлення, яка характеризує ступінь турбулентності, L – довжина траси, L_0 – зовнішній масштаб турбулентності, α, β – кутові відхилення в приймально-передавальній площині за координатами X і Y . Можна зазначити, що ця величина подвоюється при дзеркальному відбитті зонду

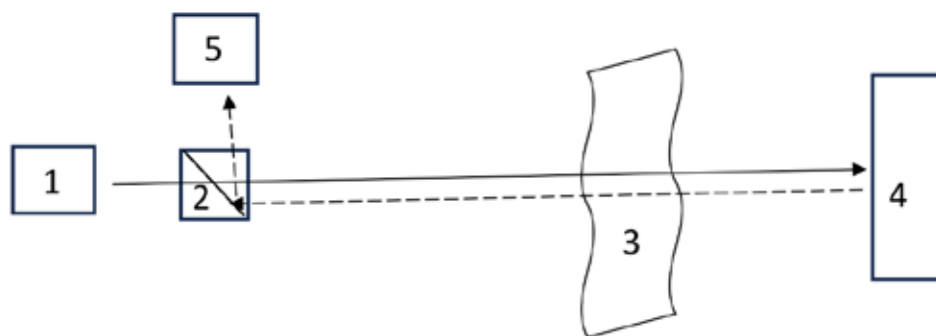


Рис. 1. Схема лазерного датчика раннього виявлення загорянь

вального променя і дворазового проходження турбулентної траси.

Флуктуації положення локального максимуму під впливом турбулентності атмосфери було зафіксовано експериментально, для чого як ПЗЗ матрицю використовували комп'ютерну мишу. Хаотичні рухи курсору на екрані монітора за наявності турбулентності представлені на рис. 2б. Оцифрування його координат давало змогу оцінювати ступінь турбулентності, що було метою роботи ЛДРВЗ.

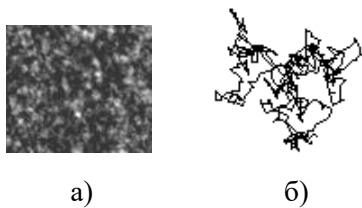


Рис. 2. Спекла картина (2а), хаотичні рухи курсору (2б)

У роботі [6, с. 111] було запропоновано найпростішу методику оцінки ефективності такого датчика. Вона полягала в обчисленні середньоквадратичного відхилення (СКВ) положення локального максимуму від відносно незворушеного положення у вертикальній і горизонтальній областях і розрахунку інтеграла ймовірності для визначення ймовірності виявлення осередку загоряння. Використання такого критерію дало змогу, зокрема, визначити ймовірності виявлення осередку загоряння за різних його положень на трасі поширення променя. Така методика є найпростішою, оскільки передбачає, що сигнал досить потужний, внутрішні шуми детектування ПЗЗ матриці надзвичайно малі, а зовнішні завади відсутні. Однак, як показують результати експериментальних досліджень такого датчика, процес змін кутового положення локального максимуму зазвичай супроводжується додатковими завадовими кутовими зсувами, зумовленими, наприклад, вібраціями об'єкта, на який нанесено світловідбивальну плівку, або іншими невеликими зсувами, і т. п. [8, с. 90; 9, с. 11-12].

У даному випадку правильне виявлення осередку загоряння може супроводжуватися хибними тривогами, відповідними до ситуації, коли хаотичні флуктуації, зумовлені турбулентністю атмосфери, відсутні, а датчик фіксує перевищення амплітуди зсуву курсору над пороговим значенням завдяки вібраціям, що виникають у промисловому приміщенні.

Інакше кажучи, крім ймовірності правильного виявлення осередку загоряння $P_{\text{виявл}}$ необхідно

враховувати також ймовірність помилкової тривоги $P_{\text{хт}}$. Зважаючи на випадкову природу фіксованих сигнальних і завадових відхилень положення курсору від незворушеного положення, подібні задачі розв'язуються за допомогою теорії ухвалення статистичних рішень.

Як правило ухвалення рішення, що максимізує $P_{\text{виявл}}$ за заданої величини $P_{\text{хт}}$ дуже часто використовують критерій Неймана-Пірсона [10, с. 112; 11, с. 4]. Використання цього критерію дає змогу побудувати криві виявлення (Probability of Detection Curves:), які подають у вигляді графіка, що містить сімейство кривих, які монотонно зростають від нуля до одиниці. Вони розраховуються на основі обчислення інтеграла ймовірності та ілюструють залежності $P_{\text{виявл}}$ від відношення сигнал/шум q , при цьому кожна криву в сімействі побудовано за певного значення ймовірності хибної тривоги $P_{\text{хт}}$ (рис. 3) [11, с. 3].

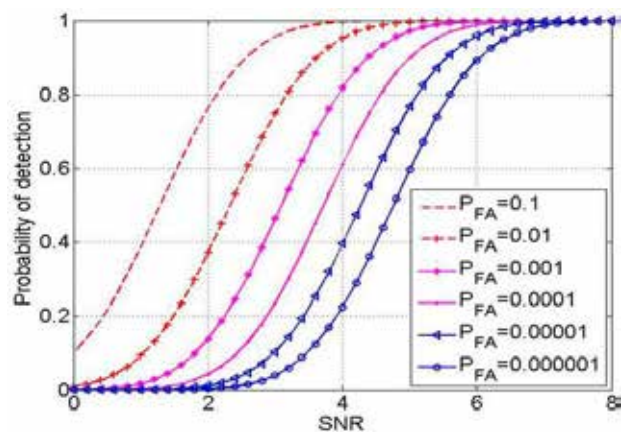


Рис. 3. Криві виявлення

Аналіз графіків кривих виявлення широко використовується в радіо-, акустичній та лазерній локації. Користуючись кривими виявлення, можна визначити пороговий сигнал, тобто сигнал, який може бути виявлений за заданими ймовірностями $P_{\text{виявл}}$ і $P_{\text{хт}}$. Пороговий сигнал можна розрахувати, знаючи відношення сигнал/шум q , величину якого можна визначити за кривими виявлення. Наприклад, користуючись даними на рис. 3 за кривими виявлення лазерного сигналу з ймовірністю $P_{\text{виявл}}=0,8$ за $P_{\text{хт}}=0,001$ необхідно забезпечити $q=4$. Звідси, зокрема, випливає, що для зменшення порогового сигналу в n разів необхідно відповідно в n разів зменшити рівень завад. І хоча наведений приклад стосується галузі лазерної локації, сформульований висновок має загальний характер для засобів виявлення, які оцінюються з використанням критерію Неймана-Пірсона. Цей параметр –

пороговий сигнал – можна вважати критерієм якості ЛДРВЗ, тому що він добре характеризує можливості датчика виявляти в умовах перешкод малі рівні корисного сигналу, тобто виявляти осередки загоряння на ранніх стадіях.

Стосовно ЛДРВЗ сформульований висновок можна інтерпретувати так. Для більш раннього виявлення осередку загоряння (зменшення потужності корисного сигналу – амплітуди кутового/просторового зсуву локального максимуму), необхідно зменшити рівень завадостійких зсувів, які спричиняються, наприклад, вібраціями. Іншими словами, необхідно розробляти завадозахищені ЛДРВЗ. Одну з подібних схем розглянуто в [12, с. 2] і представлено на рис. 4.

Вона містить лазер 1, світлорозподільники 2 і 5, область загоряння 3, ретрорефлектор 4, ПЗЗ матриці 6 і 7. Лазерний промінь розділяється на дві складові, які спрямовуються на ретрорефлектор за допомогою світлорозподільників 2 і 5. Відбиті промені направляються на відповідні ПЗЗ матриці. Необхідною умовою є те, що зондувальні промені мають бути рознесені в просторі таким чином, щоб флуктуації показника заломлення атмосфери в каналах були некорельованими, тобто рознесення променів має бути більшим за радіус кореляції турбулентної атмосфери [7, с. 143, 482]. У цьому випадку сигнали, які були отримані в кожному каналі, стають статистично незалежними на відміну від завадоподібних сигналів, які однакові в обох каналах, оскільки зумовлені вібраціями одного й того самого об'єкта.

Тоді зміщення локального максимуму в дифракційній картині, яка створюється першим променем, зумовлене двома факторами і являє собою суму

$$\Delta^I_{x,y} = \delta^I_{x,y} + a_{x,y}. \quad (2)$$

Перший доданок зумовлений впливом неоднорідностей атмосфери, а другий – вібраціями поверхні. Можна вважати, що перший доданок характеризує сигнал, а другий – перешкоду (шум).

Аналогічно можна записати для другого зондувального променя

$$\Delta^II_{x,y} = \delta^II_{x,y} + a_{x,y}. \quad (3)$$

Як уже зазначалося, складові, зумовлені флуктуаціями повітря, різні та статистично незалежні у двох каналах, а складові, зумовлені вібраціями, будуть однаковими в обох каналах. Оцифровані дані про величину відхилення в кожному каналі визначаються з частотою опитування кадру. Під час їх віднімання доданок, зумовлений вібраціями, зникає.

$$\Delta^I_{x,y} - \Delta^II_{x,y} = \delta^I_{x,y} - \delta^II_{x,y}. \quad (4)$$

Потім слід піднести до другого ступеня елементи масиву даних, провести усереднення і обчислити дисперсію (СКВ).

$$\begin{aligned} (\Delta^I_{x,y} - \Delta^II_{x,y})^2 &= (\delta^I_{x,y} - \delta^II_{x,y})^2 = \\ &= (\delta^I_{x,y})^2 - 2\delta^I_{x,y}\delta^II_{x,y} + (\delta^II_{x,y})^2 \\ \sigma^2_{xy} &= \langle (\delta^I_{x,y})^2 \rangle - \langle 2\delta^I_{x,y}\delta^II_{x,y} \rangle + \\ &+ \langle (\delta^II_{x,y})^2 \rangle = \langle (\delta^I_{x,y})^2 \rangle + \langle (\delta^II_{x,y})^2 \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Доданок $\langle 2\delta^I_{x,y}\delta^II_{x,y} \rangle$ обертається на нуль, оскільки випадкові відхилення в каналах незалежні, знакозмінні та мають середнє значення, що дорівнює нулю. Таким чином, результат обчислень характеризує тільки корисний сигнал, тобто рівень флуктуацій показника заломлення за рахунок прогрівання повітря осередком загоряння.

Теоретично в такий спосіб можна звести вплив завад до нуля і забезпечити ймовірність виявлення осередку загоряння до одиниці, тому що відношення сигнал/шум наблизитиметься до нескінченності. Однак на практиці реалізувати повне придушення перешкод не вдається, що було підтверджено експериментально.

Для зниження ступеня впливу перешкод в експериментальній установці, побудованій на основі схеми на рис. 3 як ПЗЗ матриць використовували дві однакові комп'ютерні миші, встановлені в просторі дзеркально одна до одної, так що їхні

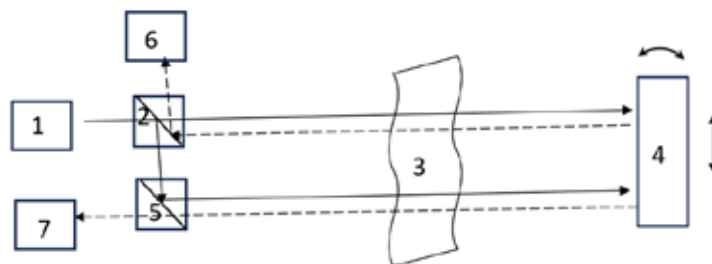


Рис. 4. Схема завадозахищеного ЛДРВЗ

координатні осі X_1 , Y_1 і X_2 , Y_2 були протилежно спрямовані. За допомогою механічного приводу штучно створювали періодичні кутові відхилення ретрорефлектора, що імітують вібрації. Зміщення курсорів двох мишей, одночасно під'єднаних до комп'ютера, були майже однаковими за амплітудою, але протилежно спрямованими, практично компенсуючи один одного, так як це було показано вище під час теоретичного аналізу.

Незважаючи на те, що в умовах експерименту використовували однакові миші, повної компенсації вібрацій об'єкта досягти не вдалося, тобто не вдалося забезпечити повну нерухомість курсору. Це зумовлено, вочевидь, можливим неузгодженням осей мишей, а також дещо різною їхньою чутливістю до зміщень. Проте, в результаті експериментальних досліджень вдалося забезпечити амплітуду результуючого зсуву курсора після компенсації впливу вібрацій на рівні 10-15% від початкового рівня.

За даної методики оцінювання ефективності ЛДРВЗ такий результат означає зменшення потужності завади в 7-9 разів, а отже, і зменшення порогової потужності датчика в таку саму кількість

разів у разі забезпечення заданого рівня ймовірності правильного виявлення осередку загоряння та ймовірності хибної тривоги.

Висновки. У роботі розглянуто методику оцінювання ефективності ЛДРВЗ на основі теорії ухвалення статистичних рішень, критерію Неймана-Пірсона та аналізу кривих виявлення. З погляду цільового призначення датчика важливим показником можна вважати порогову потужність сигналу для виявлення осередку загоряння із заданими ймовірностями правильного виявлення та хибної тривоги.

Запропоновано й експериментально перевірено метод зниження рівня завад, створюваних вібраціями та зміщеннями датчика, завдяки використанню двох ПЗЗ матриць. Вібраційні перешкоди в такій схемі взаємно знищуються, а корисні сигнали підсумовуються. Експериментально показано можливість зменшення завадової складової в 7-9 разів, що означає таке ж зменшення порогової потужності сигналу. Ця обставина робить запропонований метод компенсації перешкод досить ефективним для раннього виявлення загорянь.

Список літератури:

1. Звіт про основні результати діяльності ДСНС у 2023 році. <https://surl.li/eogyzy>. (Дата звернення 4.12.2024).
2. K. R. Nambiar. Lasers: Principles, Types and Applications. New Age International, 2006. 570 p.
3. Measures R. M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Malabar, FL: Krieger Publishing, 1992. 510 p.
4. Світловідбивні датчики. <https://www.omch.co/retroreflective-sensors/> (Дата звернення 1.12.2024).
5. G.N. Dolya, E.S. Litvinova. Retroreflective laser detector of acoustic oscillations. *Proceedings of 12th International Conference on Laser & Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM'2016)*. Sept. 15–18. Odessa, Ukraine. Pp.108–111.
6. Г.М. Доля, А.В. Кочин, О.С. Чудовська. Методика оцінки ефективності телевізійного датчика для раннього виявлення загорянь. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2009. Вип. 2/5(38). С. 4–7.
7. Joseph W. Goodman Statistical optics, Wiley. 1985. 549 p.
8. Г.М. Доля, А.М. Катунін, А.В. Кочин, О.С. Чудовська. Щодо заважаючого впливу вібрацій на роботу датчика для виявлення джерел загорянь. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2009. Вип 2(10). С. 89–91.
9. Gregory Dolya, Olena Lytvynova, 2017. Modeling the Method of Laser Doppler Speckle-Velocimetry for Flat Objects with Retroreflective Surface, *Asian Engineering Review, Asian Online Journal Publishing Group/* vol. 4(2). Pp. 7–13.
10. Skolnik M., Introduction to Radar Systems, New York, McGraw-Hill, 3rd Edition. 2001. 153 p.
11. Rang Liu, Dejiang Wang, Ping Jia, He Sun. An Omnidirectional Morphological Method for Aerial Point Target Detection Based on Infrared Dual-Band Model. *Remote. Sens.* 2018. 10(7). 1054 p. <https://doi.org/10.3390/rs10071054>.
12. Лазерний датчик раннього виявлення загорянь. Патент України на корисну модель № 148977. 2021. 6 с.

Dolya G.M., Romaniuk V.A., Starodubtsev S.O. EFFICIENCY OF RRS BASED LASER SENSOR FOR EARLY IGNITION DETECTION IN A NOISY ENVIRONMENT

The paper is devoted to the analysis of efficiency of retroreflector based laser sensor for early ignition detection in an environment that has external interference.

In Ukraine with the start of an aggressive full-scale war, which was started by Russia, the number of fires increased sharply. This is the result of bombings and shelling carried out by the aggressor on critical and civil infrastructure, administrative and educational facilities. In this regard, there is a need to increase the level of security of objects; to reduce the time from the moment of the start of the fire until the signal is given by the smoke sensor; to reduce the influence of extraneous factors on the reliability of the signal about the start of the fire. Such factors at the present time are powerful explosions, which in turn cause high-energy sound waves, vibrations of buildings, and bright flashes.

As a result, during explosions, the fire may not start, but the fire alarm system will give a signal about the beginning of the fire. The fire alarm systems, which are used in Ukraine need to be modernized by improving reliability and protection against issuing a false alarm.

A Methodology for assessing the effectiveness of laser sensor for early ignition detection in a noisy environment is proposed based on the theory of statistical decision making, the Neyman-Pearson criterion and analysis of detection curves. It is shown that for the laser sensor for early ignition detection in a noisy environment the threshold signal power can be considered, as an important indicator for detecting a fire source with given probabilities of correct detection and the probability of a false alarm.

A method has been proposed to reduce the level of interference created by vibrations and displacements of the sensor through the use of two CCD matrices. Experiment that proves proposed approach is discussed. It is shown that vibrational interference in such a schema cancels out and the useful signals are summed up. The possibility of reducing the interference component has been experimentally shown, which means the same reduction in the threshold signal power. Proposed interference compensation method is shown to be very effective for early detection of fires.

Key words: *laser sensor, laser spot, reflector, fire detection, threshold power, vibration interference.*

УДК 617.75.089.28:004.451.7.031.43 (045)
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/06>

Монченко О.В.

Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Кучеренко В.Л.

Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Тищенко Є.О.

Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Марченко Н.Б.

Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Чубко Л.С.

Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

МОДЕРНІЗАЦІЯ РОБОТИ РЕТИНАЛЬНОГО ЗОРОВОГО ПРОТЕЗА ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЯКІСНОГО ЗОБРАЖЕННЯ З ІМПЛАНТУ СІТКІВКИ

У статті розкрито та визначено сучасні виклики та розробки у області ретинальних зорових протезів, що відкриває нові горизонти для відновлення зору людей з важкими ушкодженнями сітківки, акцентуючи на необхідності модернізації технологій для підвищення якості сприйнятого зображення. Проведено аналіз поточного стану протезування, розроблено новітні методи обробки сигналів та експериментальне тестування. Матеріали статті спрямовані на забезпечення глибшого розуміння процесів, що лежать в основі покращення візуального сприйняття через ретинальні протези. Досліджено шляхи вдосконалення технічних характеристик імплантів задля максимального наближення якості відтвореного зображення до природного зору, відкриваючи тим самим нові можливості для візуальної реабілітації.

Розроблено нове програмне забезпечення, що мінімізує шуми і покращує роздільну здатність, стає ключовим елементом у досягненні поставленої мети. Акцентовано увагу на мультидисциплінарному підході, об'єднуючи зусилля в областях нейронауки, біомедичної інженерії та матеріалознавства для створення комплексних рішень, здатних відтворювати високоякісне зображення. У статті висвітлено взаємодію між технологіями та людським зором для створення проривних рішень у відновленні зору.

Ключові слова: ретинальні протези, модернізація, якість зображення, обробка сигналів, відновлення зору, сітківка, експериментальне тестування, технологічний розвиток, візуальна реабілітація.

Постановка проблеми. Статистика свідчить про зростаючу кількість людей, які стикаються з проблемами зору, що значно знижує якість їхнього життя. Значне зростання кількості людей, які страждають на важкі вади зору та сучасні досягнення в області біомедичної інженерії та нанотехнологій відкривають нові можливості для створення ефективних рішень, здатних відновити втрачені зорові функції [1-2]. Проте, попри значний прогрес у цій галузі, існують

численні виклики та обмеження, пов'язані з інтеграцією протезів, їхньою функціональністю та забезпеченням високої якості зображення для користувачів. Це створює необхідність подальших досліджень та розробок у цьому напрямку. Стаття зосереджена на аналізі сучасних розробок ретинальних зорових протезів та висвітлює розробку нового підходу до модернізації роботи цих пристроїв [3-4]. Основною метою є покращення якості зображення, яке отримують користувачі, за

рахунок використання інноваційних матеріалів, технологій та алгоритмів обробки даних. Важливість теми дослідження обумовлена не тільки науковими та технічними аспектами, але й соціальним впливом, адже вдосконалені ретинальні протези можуть значно покращити якість життя людей з обмеженими можливостями зору, дозволяючи їм краще адаптуватися до повсякденного життя, збільшити їхню самостійність та соціальну активність [5-6]. Розвиток цієї галузі має велике значення для медичної науки, технологій та суспільства в цілому, відкриваючи нові горизонти для подолання вад зору [7-9].

За результатами дослідження, ми очікуємо не лише підвищення роздільної здатності зображення, але й зменшення енергоспоживання протеза, що має велике значення для тривалого комфортного використання. Такі досягнення стануть вагомим внеском у розвиток технологій допомоги людям з обмеженими можливостями та сприятимуть подальшим науковим дослідженням у цій галузі.

У цьому контексті дослідження є важливим кроком на шляху до розробки більш ефективних та доступних рішень для людей, які втратили зір, і відкриває нові перспективи для подальшого вдосконалення технологій відновлення зору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні зорові протези представляють собою високотехнологічні рішення, розроблені з метою часткового відновлення зорових функцій у людей з вадами зору [10]. Ці пристрої варіюються від електронних імплантатів, які стимулюють зоровий нерв або сітківку, до складних систем, що включають камери та мікрочіпи для перетворення зображень з зовнішнього середовища у зорові сигнали. Останні дослідження у цій галузі спрямовані на покращення якості сприйняття, збільшення роздільної здатності та створення більш натуралістичних зорових вражень для користувачів.

Проте, незважаючи на значний прогрес, існуючі зорові протези все ще мають суттєві обмеження [11]. Однією з основних проблем є обмежена роздільна здатність, що впливає на деталізацію сприйняття зображення. Це пов'язано з технічними обмеженнями імплантатів та обмеженою кількістю електродів [12], що можуть бути безпечно імплантовані в зорову систему людини. Крім того, користувачі зорових протезів часто стикаються з проблемами адаптації та інтерпретації сигналів, особливо в умовах зовнішнього шуму, що може спотворювати або зменшувати якість

переданого зображення. Ще одним важливим обмеженням є висока вартість зорових протезів та їх імплантації, що робить їх недоступними для широкого кола пацієнтів у багатьох країнах світу [13]. Також варто зазначити проблеми, пов'язані з тривалістю життя пристроїв, необхідністю їх регулярної заміни або модернізації, а також потенційними ризиками та ускладненнями, що можуть виникати під час або після хірургічного втручання.

Враховуючи зазначені виклики, очевидною стає потреба у подальших дослідженнях та розробках в області зорових протезів. Особливу увагу слід приділити покращенню технологій обробки та фільтрації сигналів для мінімізації впливу шумів, розробці нових матеріалів та методів імплантації [14], що дозволять збільшити роздільну здатність та тривалість служби пристроїв, а також знизити їх вартість для забезпечення ширшого доступу до цих життєво важливих технологій. Шум у зорових протезах є критичним фактором, який може значно погіршити якість сприйняття зображення користувачами цих пристроїв [15]. Шумові ефекти виникають внаслідок різноманітних джерел, зокрема електронного шуму компонентів протезу, впливу зовнішнього середовища та непередбачуваної взаємодії з біологічними тканинами. Ці шуми можуть викликати спотворення сигналу, який передається до зорового нерву, що, в свою чергу, призводить до зниження якості та точності зорового сприйняття.

Особливо важливим є вплив шуму на сприйняття контрастності та деталізації зображення. Шум може «замаскувати» слабкі сигнали, що надходять від мікрочіпа протезу до сітківки, роблячи неможливим розрізнення між відтінками або деталями зображення. Це стає значною перешкодою для ефективності зорових протезів, оскільки однією з основних їхніх цілей є відновлення спроможності користувачів розпізнавати об'єкти та орієнтуватися в просторі. Крім того, шум впливає на стабільність зорового сприйняття, викликаючи випадкові або помилкові зорові враження, які можуть дезорієнтувати користувача. Для мінімізації цих ефектів розробники зорових протезів вдаються до використання різноманітних технік фільтрації та обробки сигналів, спрямованих на підвищення якості передачі сигналів і зниження впливу шумових факторів.

Таким чином, дослідження та розробка методів боротьби з шумом у зорових протезах є ключовим елементом у покращенні якості зорового сприйняття користувачів. Впровадження новітніх

технологій обробки сигналів, здатних ефективно відфільтровувати шум та підсилювати корисний сигнал, відкриває нові можливості для подальшого вдосконалення функціональності та ефективності зорових протезів, роблячи їх більш доступними та комфортними для користувачів [16].

Постановка завдання. Мета дослідження полягає в модернізації ретинального зорового протеза для значного покращення якості зображення, що отримує користувач.

Основною метою дослідження є розробка програмного забезпечення, спрямованого на зменшення впливу шуму на якість передачі сигналів у зорових протезах. Це програмне забезпечення має на меті оптимізувати обробку сигналів, що надходять від зорових протезів до зорового нерва, забезпечуючи тим самим покращене сприйняття зображення для користувачів. Передбачається, що застосування спеціалізованих алгоритмів фільтрації та обробки дозволить значно знизити рівень шуму, який впливає на якість зорових вражень, підвищуючи таким чином ефективність зорових протезів.

Успішна реалізація цієї мети вимагає вирішення низки задач, серед яких:

1. Аналіз існуючих методів обробки сигналів в зорових протезах та виявлення основних джерел шуму.
2. Розробка нових алгоритмів фільтрації, здатних ефективно відокремлювати корисний сигнал від шуму.
3. Тестування розробленого програмного забезпечення на моделях зорових протезів для оцінки його ефективності у реальних умовах.
4. Аналіз отриманих результатів та їх порівняння з даними, отриманими за допомогою традиційних методів обробки.

Реалізація цієї мети не лише покращить якість життя користувачів зорових протезів, але й відкриє нові перспективи для подальших досліджень у сфері відновлювальної медицини та біоніки.

Задачі, визначені в межах дослідження, включають в себе кілька ключових напрямків роботи, спрямованих на покращення функціональності зорових протезів через мінімізацію впливу шумів. Перша задача полягає у моделюванні сигналів, що імітують зорові відчуття, для виявлення та аналізу джерел шумів у цих сигналах. Це включає розробку математичних та комп'ютерних моделей, які можуть точно відтворювати роботу сітківки та зорових нервів, а також взаємодію між зоровим протезом і біологічними тканинами.

Другою ключовою задачею є фільтрація шуму, яка передбачає розробку та впровадження алгоритмів обробки сигналів для відділення корисної інформації від шумових даних. Це вимагає комплексного підходу до аналізу сигналів, зокрема використання методів штучного інтелекту та машинного навчання для розпізнавання та придушення шуму без втрати важливої інформації.

Третьою задачею є тестування покращення якості сприйняття, що включає проведення експериментів для оцінки ефективності розробленого програмного забезпечення у реальних умовах. Це передбачає використання прототипів зорових протезів з впровадженим програмним забезпеченням для зменшення шуму, а також залучення учасників дослідження для оцінки змін у їх зоровому сприйнятті.

Реалізація цих задач дозволить не лише покращити якість сприйняття зорових протезів, але й зробити значний крок вперед у розвитку біонічних технологій, спрямованих на відновлення зору.

Виклад основного матеріалу. Дослідження було спрямоване на вивчення впливу різних методів обробки сигналів та застосування інноваційних матеріалів для покращення якості візуального сприйняття через ретинальні протези.

Об'єктом дослідження був епіретинальний зоровий протез, який включає масив титанових електродів. Основною гіпотезою дослідження було припущення, що застосування спеціалізованого програмного забезпечення для фільтрації сигналу може покращити якість фосфенової картини. Припущення включали в себе можливість зменшення шумів в сигналах та покращення якості зображення. У дослідженні використовувалися програмне забезпечення MATLAB для фільтрації сигналів та аналізу даних, а експерименти проводилися з використанням моделей сигналів, які імітують реальні умови роботи протеза [16].

Методологія дослідження базується на розробці програми для зменшення шумів в сигналах ретинальних зорових протезів та покращенні фосфенової картини. Використані методи включають сучасні програмні засоби для обробки сигналів, аналіз даних з ретинального імплантату, та моделювання сигналів з накладеними шумами. Експериментальні дані надано офтальмологічним відділенням, а обробка даних здійснювалася за допомогою оптимального фільтра Вінера. Дослідження включало фільтрацію сигналу та аналіз отриманих фосфенових картин для оцінки ефективності модернізації.

Дослідження базувалося на використанні тестових зображень, зокрема великої літери «Г», для вимірювання якості сприйняття через ретинальний протез. Експерименти включали в себе зміну параметрів обробки сигналів, аналіз впливу шумів та оцінку ефективності різних фільтрів для покращення візуального сприйняття. Експериментальні дані та відповідні графіки, використані у цьому дослідженні, були забезпечені офтальмологічною клінікою «Лікарська практика». Серед найважливіших даних виділяються графіки зорового викликаного потенціалу на стимул (рис. 1) і локальні електроретинограми, отримані від одного з пацієнтів. Для наочного порівняння, на рисунку 2 представлено порівняння локальних ЕРГ між здоровою особою та згаданим пацієнтом.

Зібрані під час експериментів дані аналізувалися з метою ідентифікації оптимальних методів обробки сигналів. Використання оптимального фільтра Вінера дозволило ефективно відокремити корисний сигнал від шуму, що сприяло покращенню якості відтворення зображення.

Модель ретинального зорового протеза для дослідження

Для дослідження було використано модель, яка являє собою епіретинальний зоровий протез

з титановою електродною решіткою 16x16, який був встановлений пацієнту з пігментною дегенерацією сітківки. Протез був спеціально розроблений для експериментального вивчення механізмів передачі візуальної інформації в умовах лабораторного моделювання. Дослідження було зосереджене на моделюванні сигналу відповіді сітківки з накладеним шумом від самого протеза та зовнішніх джерел і подальшою його фільтрацією для покращення якості фосфенового зображення. У моделі накладені артефакти, такі як білий адитивний шум, артефакт імпульсу стимуляції та завада, спричинена рухом очей.

Для обробки даних електроретинограм (ЕРГ) графік перетворювався у масив даних, який програма могла сприймати. За допомогою команд `load` і `plot` у MATLAB будувалося і виводилося зображення сигналу на екран, до якого додавались заголовки та підписи змінних по осям, демонструючи як інформація від сигналу перетворювалася у візуальне зображення (рис. 3).

Модель адитивного шуму визначається як білий шум: це стаціонарний гаусовий випадковий процес із середнім значенням, що дорівнює нулю, і постійним широким спектром щільності потужності. Використовуючи функцію `randn`, ми симулюємо дискретний білий шум із середнім

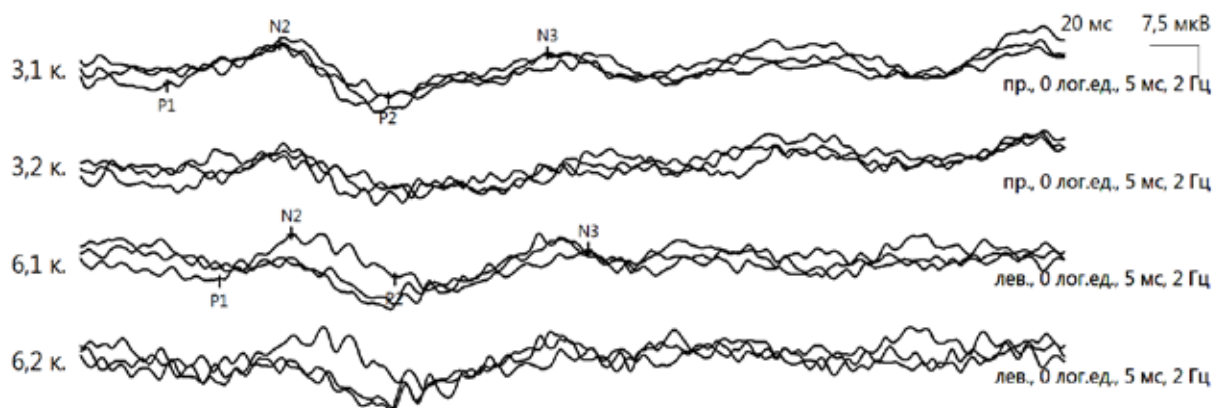


Рис. 1. Зоровий викликаний потенціал на сполох даного пацієнта

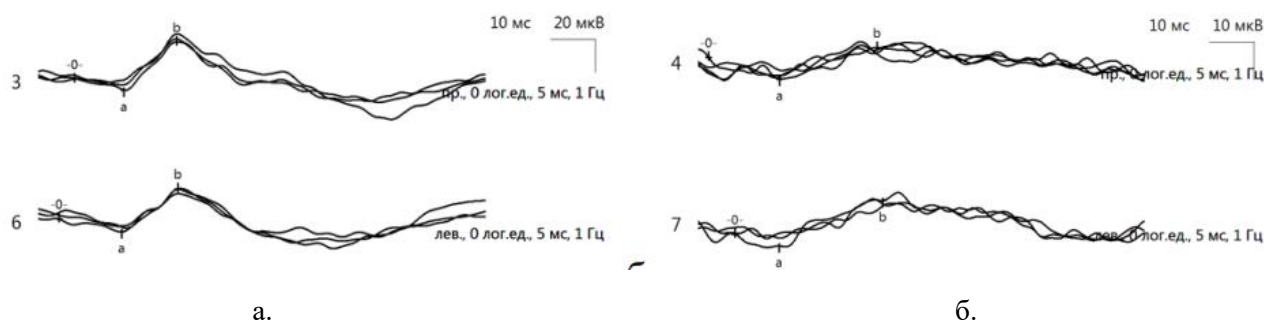


Рис. 2. Локальні ЕРГ здорової людини (а) та пацієнта (б)

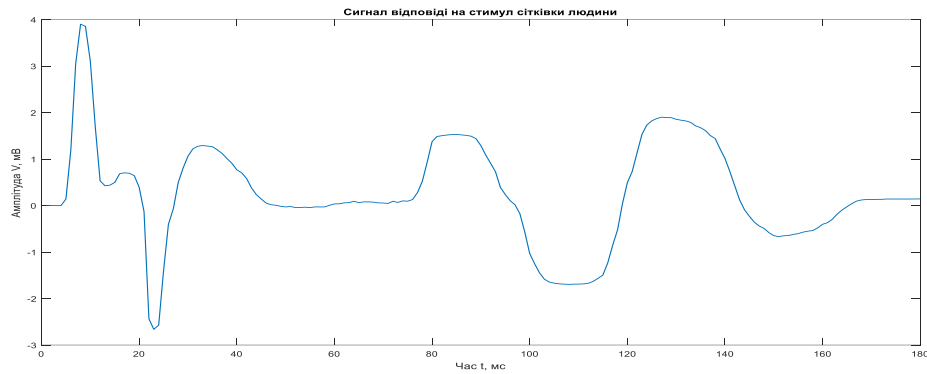


Рис. 3. Досліджуваний сигнал відповіді клітин сітківки

значенням $\mu = 0$ і дисперсією $D = 0,01$ при частоті дискретизації $f_s = 200 \text{ Гц}$.

Артефакти руху ока та імпульсу наведені на рисунках 4 та 5 відповідно.

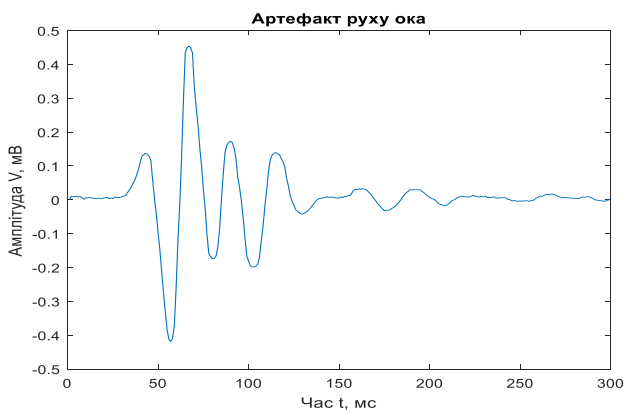


Рис. 4. Сигнал завади у вигляді руху ока

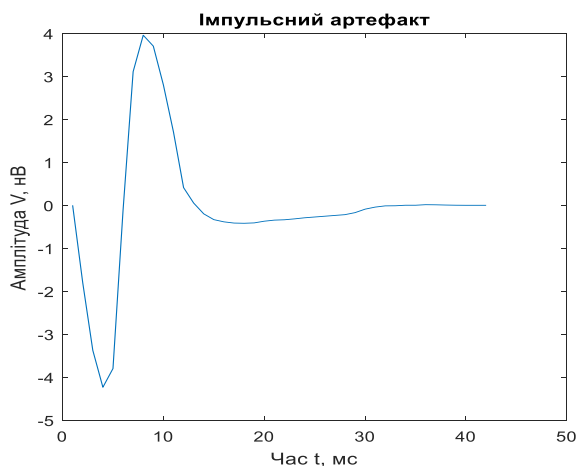


Рис. 5. Сигнал імпульсного артефакту

Послідовно додаємо вибрані шуми до обраного сигналу та за допомогою команд `figure` та `plot` відображаємо на екрані зображення сигналу з шумом (рис. 6).

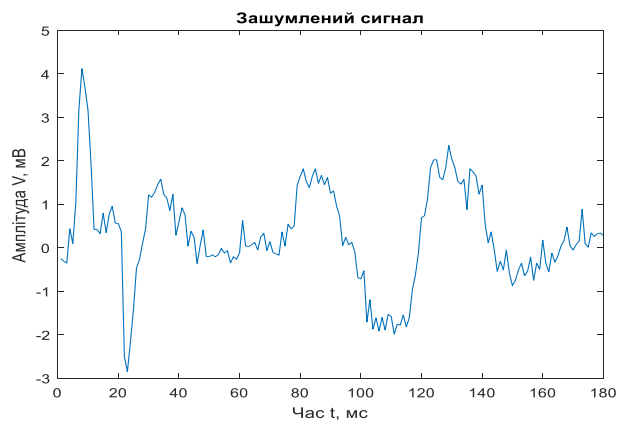


Рис. 6. Досліджуваний сигнал з накладеними шумами

Фактично, даний сигнал є показником процесів, що відбуваються на сітківці, тому його можна використати для відображення фосфенової картини.

Для дослідження якості отриманого зображення було обрано рисунок великої білої літери «Г» на чорному фоні (рис. 7).

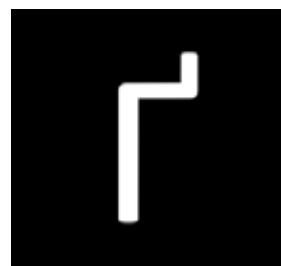


Рис. 7. Візуальний образ для дослідження

Щоб імпортувати зображення до робочого середовища MATLAB, застосовували функцію $f = \text{imread}()$, а для його відображення на екрані використовувалась команда `imshow`. Використовуючи параметри стимуляції, а також використовуючи графіки та дані, отримані від клініки і зазна-

чені у відповідних дослідженнях, демонструємо на екрані симуляцію фосфенового зображення з високоякісною стимуляцією (рис. 8) та з зашумленого сигналу (рис. 9).

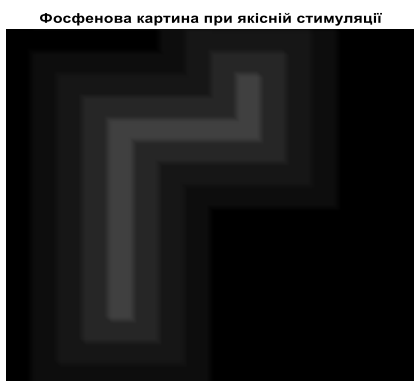


Рис. 8. Умовне фосфенове зображення при якісній стимуляції



Рис. 9. Умовне фосфенове зображення на хворій сітківці

Візуальне порівняння цих зображень чітко демонструє, як шуми у ретинальних зорових протезах можуть істотно змінити фосфенове зображення на сітківці, тому видалення цих шумів допомагає значно покращити візуальне сприйняття сцени для користувача протезу.

Фільтрація сигналу та виведення фосфенової картини.

Щоб усунути адитивний шум і завади, спричинені рухом очей, ми вдаємося до використання оптимального фільтра, зокрема, фільтра Вінера з визначеними параметрами. Створюємо оптимальний фільтр Вінера довжиною $L=32$, використовуючи формулу Вінера-Хопфа, обчислення якої здійснюється функцією `wiener_hopf`. Код цієї функції наступний:

```
function w = wiener_hopf(x,y,L)
x = x(:);
y = y(:);
rxx = xcorr(x,L);
rxy = xcorr(x,y,L);
rxx_matrix = toeplitz(rxx(L+1:end));
w = rxx_matrix\rxy(L+1:end);
end
```

Для фільтрації зашумленого сигналу і порівняння початкового та відфільтрованого сигналів у одному графічному вікні ми створюємо відповідні графіки (рис. 10).

Оскільки параметри стимуляції відомі, можна точно розрахувати вплив імпульсного артефакту. Використовуючи команду `sgor`, ми вирізаємо артефакт імпульсу в тому часовому діапазоні, де

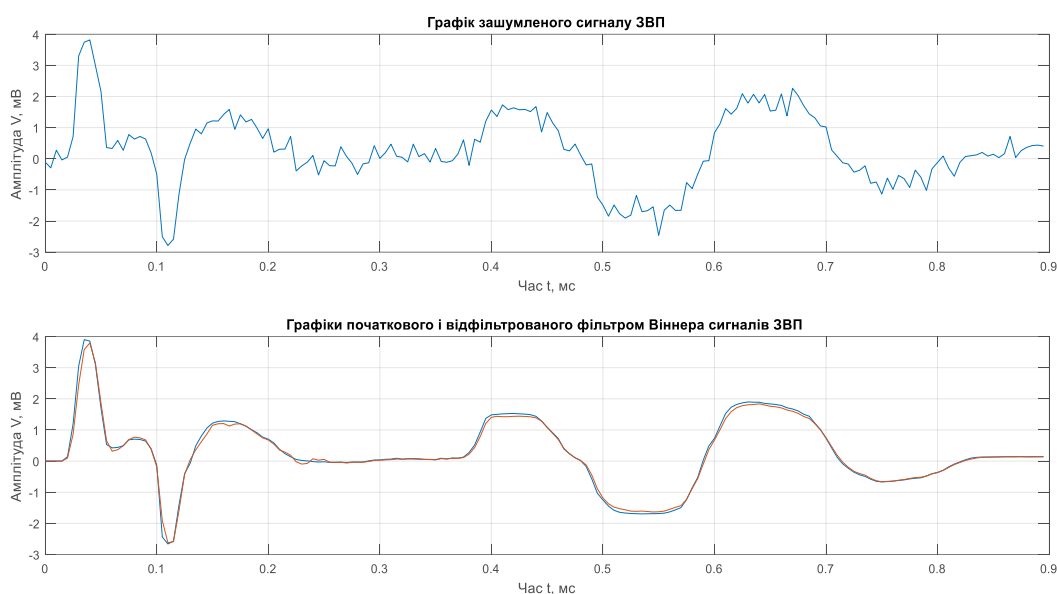


Рис. 10. Результати фільтрації адитивного шуму та руху ока

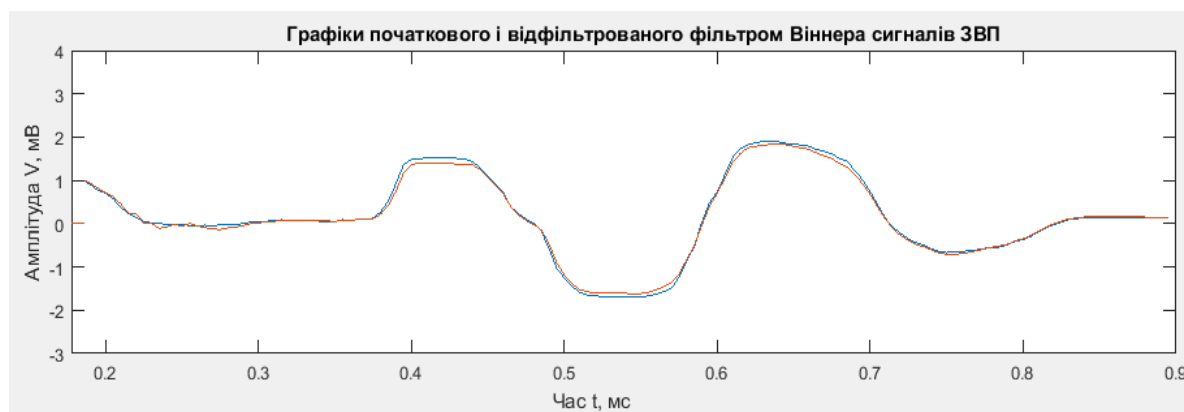


Рис. 11. Очищений сигнал відповіді клітин сітківки на стимуляцію ретинальним зоровим протезом

його вплив є найбільш вираженим. Результати цієї операції представлені на графіку, що розміщено на рисунку 11.

З цього сигналу, очищеного від шумів, завад та артефактів, генеруємо фосфенове зображення, аналогічно до того, як це було зроблено в попередньому пункті, результати чого представлені на рисунку 12.



Рис. 12. Фосфенова картина очищеного сигналу

Як демонструє отримане зображення, якість сигналу, що генерується клітинами сітківки у відповідь на стимуляцію за допомогою електродного масиву ретинального протезу, справді має вирішальний вплив на якість фосфенового зображення, яке сприймає користувач протезу. При цьому, чим менше шумів присутньо на сигналі, тим фосфени видаються більш виразними та яскравими. Моделювання було проведено для вивчення відгуку клітин сітківки на стимуляцію за допомогою електродів ретинального протезу, при цьому були застосовані різні види шумів, типових для зорових протезів, включаючи адитивний білий шум, шуми від стимулюючих імпульсів

та інтерференції, що виникають через рух очей. Використання фільтра Вінера дозволило оптимально очистити сигнал від цих шумів.

Моделі фосфенових зображень були розроблені на основі трьох різних станів сигналу: «ідеального», перед фільтрацією та після неї. Оцінка ефективності фільтрації була здійснена за допомогою візуального аналізу цих зображень, які були класифіковані як «чіткі» або «неясні» в залежності від якості візуального сприйняття. У ході експериментів була проведена детальна моделізація та аналіз артефактів, що виникають під час роботи протеза. Серед них виявлені білий адитивний шум, імпульсні артефакти стимуляції, та завади, викликані рухом очей. Використання великої літери «Г» як тестового зображення дозволило візуалізувати вплив цих артефактів на кінцеву якість фосфенового зображення.

Застосування спеціально розробленої програми з алгоритмами фільтрації, зокрема оптимального фільтра Вінера, дозволило значно покращити якість візуального сигналу. Результати показали, що фільтрація здатна ефективно мінімізувати вплив шумів та артефактів, забезпечуючи чіткіше та якісніше відтворення зображення. Окрім технічних аспектів, результати дослідження мають велике значення для покращення якості життя людей з серйозними вадами зору.

Дослідження підтвердило, що інноваційні методи фільтрації, зокрема використання оптимального фільтра Вінера, мають великий потенціал для покращення роботи ретинальних зорових протезів. Результати демонструють, що за допомогою сучасних технологій можливо значно покращити якість переданого протезом зображення, що є важливим кроком на шляху до подальшого розвитку та вдосконалення цих пристроїв у медичній практиці. Водночас, дослідження відкриває шляхи для роз-

робки нових стратегій соціальної інтеграції людей з обмеженими можливостями зору, пропонуючи їм новітні рішення для покращення якості життя.

У ході проведеного дослідження була розглянута ефективність застосування алгоритмічної обробки сигналів з ретинальних імплантатів у контексті покращення якості зорових відчуттів. Основною метою було зниження рівня шуму в сигналах, що передаються через зорові протези, для досягнення кращого візуального сприйняття. Застосування спеціалізованого програмного забезпечення з адаптивними фільтрами та алгоритмами машинного навчання продемонструвало значне покращення у якості сприйняття образів.

Результати дослідження підкреслили критичну важливість точної калібрування стимуляції сітківки та фільтрації сигналів. Оптимізація зорового відображення через ретельну настройку параметрів стимуляції дозволяє забезпечити максимально чітке та якісне сприйняття образів. У цьому контексті використання адаптивних фільтрів та алгоритмів машинного навчання відкриває нові можливості для покращення візуальної інформації, що сприймається користувачами зорових протезів.

Дослідження відкриває шляхи для подальшого розвитку зорових протезів, акцентуючи увагу на важливості інтеграції передових технологій обробки сигналів. Покращення алгоритмів фільтрації та калібрування стимуляції може значно збільшити ефективність протезів, роблячи їх більш адаптивними до індивідуальних потреб користувачів. Поліпшення якості зорового сприйняття через використання ретинальних протезів має не лише технічне, але й глибоке соціальне значення, що надає людям із важкими вадами зору можливість краще адаптуватися до соціального середовища, підвищуючи їх самостійність та якість життя. На основі отриманих даних можна зробити висновок, що інтеграція розширених алгоритмів обробки сигналів у розробку та вдосконалення ретинальних зорових протезів відкриває нові перспективи для значного покращення зорового сприйняття, що стимулює подальші дослідження та розробку в цій області, маючи на меті створення більш ефективних та доступних рішень для людей з обмеженими можливостями зору.

Висновки. Проведене дослідження підкреслює значний потенціал інноваційних підходів у модернізації ретинальних зорових протезів для покращення якості зображення, зниження енергоспоживання, та підвищення загального комфорту користувачів. Важливість цієї роботи полягає не тільки в теоретичному аспекті, а й у практичній значущості отриманих результатів, які відкривають нові можливості для подальшого розвитку та вдосконалення технологій зорових протезів. Дослідження вносить вклад у розвиток технологій, що сприятимуть значному покращенню якості життя людей з порушеннями зору, надаючи їм більше можливостей для самостійності та соціальної активності. Особливо цінним є вплив на соціальну інтеграцію осіб з обмеженими зоровими можливостями, забезпечуючи їм доступ до більш якісної та змістовної взаємодії з оточуючим світом.

Аналіз будови та принципів роботи ретинальних зорових протезів, а також унікальне явище утворення фосфенів через електродну стимуляцію сітківки, вказує на існуючі виклики та відкриває перспективи для подальших досліджень. Розроблене програмне рішення для моделювання та фільтрації сигналів з ретинальних протезів демонструє здатність до отримання високоякісних зображень, що є кроком вперед у покращенні функціональності протезів.

Результати дослідження підтверджують важливість подальшого вивчення та розробки ретинальних зорових протезів з використанням сучасних технологій обробки сигналів. Проведене дослідження є свідченням того, що інтеграція інноваційних підходів може значно вдосконалити існуючі технології, відкриваючи нові горизонти для лікування сліпоти та серйозних порушень зору. У сукупності, дослідження відзначається не лише досягненнями у сфері зорових протезів, але й наголошує на потенціалі технологій для створення більш доступних, ефективних та комфортних рішень для людей з вадами зору. Передові розробки у цій області обіцяють значні переваги для подальшого вдосконалення зорової реабілітації, відкриваючи нові можливості для забезпечення більшої якості життя і незалежності осіб, які стикаються з викликами вад зору.

Список літератури:

1. Hartong D.T., Berson E.L., Dryja T.P. Retinitis pigmentosa. The Lancet. Elsevier, 2006. November (vol. 368, no. 9549). P. 1795-1809. DOI:10.1016/S0140-6736(06)69740-7. PMID 17113430.
2. «Restoration of vision in blind individual using bionic devices: A review with A focus on cortical visual prostheses». January 2015. Brain Research 1595(1):51-73; DOI:10.1016/j.brainres.2014.11.020.

3. «New Vision for Visual Prostheses». 2020 February 18 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7040096/>
4. «Modern concepts of bionic vision». January 2022. Vestnik Oftalmologii 138(3):95. DOI:10.17116/oftalma202213803195
5. «Advances in retinal prosthesis systems». January 2019. The rapautic Advancesin Ophthalmology 11:251584141881750. DOI:10.1177/2515841418817501
6. «Systematic Review of Novel Advancesin Epiretinal and Subretinal Prosthesis». March 2022. DOI:10.5606/jebms.2021.75674
7. «Clinical Progress and Optimization of Information Processingin Artificial Visual Prostheses». August 2022. Sensors 22(17):6544 DOI:10.3390/s22176544
8. «Retinal Prostheses – Now and in the Future». 9 June 2017 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://surl.li/mbldhn>
9. «Visual Prosthesis for Optic Nerve Stimulation». June 2009. DOI:10.1007/978-0-387-77261-5_2. Inbook: Implantable Neural Prostheses 1 (pp.43-83). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://surl.li/yjvnqo>
10. «The Argus II Retinal Prosthesis System». April 3rd 2019 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://surl.li/qggekku>
11. «Bionic Vision Technologies: A Closer Look at the Bionic Eye System» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://bionicvis.com/products-technology/>
12. «Retinal Prosthetic Approaches to Enhance Visual Perception for Blind Patients». 2020 May 24 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7281011/>
13. «Retinal Prostheses and Artificial Vision». 2019 September 3 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6761377/>
14. «Seeking enlightenment: the quest to restore vision in humans». December 29, 2020 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://surl.li/iayuva>
15. «Progress in the clinical development and utilization of vision prostheses: anupdate». Alice Brandli, Chi D Luu, Robyn H Guymer, and Lauren N Ayton. Eye Brain. 2016; 8: 15–25. Published online 2016 May 11. doi: 10.2147/EB.S70822. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5398739/>
16. «Simulating prosthetic vision: I. Visual models of phosphenes». Spencer C. Chen, Gregg J. Suaning, John W. Morley. Vision Research. Volume 49, Issue 12, June 2009, Pages 1493-1506 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://surl.li/gvxxvj>

Monchenko O.V., Kucherenko V.L., Tishchenko Ye.O., Marchenko N.B., Chubko L.S.

MODERNIZATION OF THE RETINAL VISUAL PROSTHESIS TO OBTAIN A HIGH-QUALITY IMAGE FROM THE RETINAL IMPLANT

The article reveals and identifies current challenges and developments in the field of retinal visual prostheses, which opens up new horizons for restoring vision in people with severe retinal damage, emphasizing the need to modernize technologies to improve the quality of the perceived image. An analysis of the current state of prosthetics is carried out, and the latest signal processing methods and experimental testing are developed. The materials of the article are aimed at providing a deeper understanding of the processes underlying the improvement of visual perception through retinal prostheses.

Ways to improve the technical characteristics of implants have been investigated in order to maximize the quality of the reproduced image to natural vision, thereby opening up new opportunities for visual rehabilitation.

New software has been developed that minimizes noise and improves resolution, becoming a key element in achieving the goal. The emphasis is on a multidisciplinary approach, combining efforts in the fields of neuroscience, biomedical engineering and materials science to create comprehensive solutions capable of reproducing high-quality images. The article highlights the interaction between technologies and human vision to create breakthrough solutions in vision restoration.

Key words: retinal prostheses, modernization, image quality, signal processing, vision restoration, retina, experimental testing, technological development, visual rehabilitation.

Осадчук О.В.

Вінницький національний технічний університет

Мартинюк В.В.

Вінницький національний технічний університет

Євсєєва М.В.

Вінницький національний медичний університет імені М.І. Пирогова

Мартинюк Г.І.

Вінницький національний технічний університет

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ (КУПРУМ, БІСМУТ)ВМІСНОГО В-ДИКЕТОНАТУ

Стаття присвячена дослідженню впливу температури та магнітного поля на фізичні параметри (купрум, бісмут)вмісного β -дикетонату. В роботі наведено методiku синтезу та виділено в твердому стані гетерометалічну координаційну сполуку. Експериментально доведено, що отримана сполука в спресованому стані володіє напівпровідниковими властивостями. Для синтезу гетероядерної координаційної сполуки використано безводні хлориди бісмуту (III) і купруму (II) та пентан-2,4-діон, реакцію проведено в середовищі 2-пропанолу при нагріванні. Показано, що швидкість реакції синтезу координаційної сполуки та її практичний вихід зростає в присутності протонно-акцепторного реагента. Встановлено практичний вихід синтезованого продукту, який дорівнює 84% від теоретично обчисленого. Підтверджено чистоту та ідентичність гетероядерного μ -пентаізопропокси(трикупрум(II), бісмут(III))тетраацетилацетонату (I) на основі даних елементного аналізу. Визначено, що до складу сполуки (I) входять атоми двох різних за природою металів, які знаходяться у співвідношенні $\text{Cu} : \text{Bi} = 3:1$ і вона має таку брутто формулу: $\text{Cu}_3\text{BiC}_{35}\text{O}_{13}\text{H}_{68}$. Проведено дослідження магнітних властивостей за кімнатної температури, аналіз ІЧ-спектрів у твердому стані та термодериватографічне дослідження в інтервалі температур 20-900°C виділеного гетероядерного β -дикетонату. На основі отриманих даних для даної координаційної сполуки запропоновано поліядерну будову. В спресованому стані досліджено вплив температури та магнітного поля на фізичні властивості отриманого матеріалу на основі сполуки (I). Встановлено температурну залежність електропровідності отриманого μ -пентаізопропокси(трикупрум(II), бісмут(III))тетраацетилацетонату і показано, що при збільшенні температури від 303 K до 423 K його питомий опір суттєво зменшується від $5 \cdot 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до $8 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, що свідчить про наявність напівпровідникових властивостей. На основі отриманих експериментальних даних обчислено питому провідність дослідженого матеріалу, при $T_1 = 303 \text{ K} - \sigma_1 = 2,00 \cdot 10^{-10} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$, а для $T_2 = 423 \text{ K} - \sigma_2 = 0,125 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ та встановлено ширину забороненої зони $\Delta E = 1,86 \text{ eV}$. Доведено, що досліджуваний матеріал є напівпровідником з носіями струму обох знаків.

Ключові слова: напівпровідник, магнітне поле, температура, індукція, гетероядерні комплексні сполуки.

Постановка проблеми. В наш час напівпровідникові резистивні сенсори широко використовуються в різних галузях народного господарства. Серед великого числа відомих сенсорів особливе місце займають термосенсори, які є базовим елементом для створення датчиків іншого типу, наприклад, механічних, радіаційних, біологічних та хімічних [1-3]. Оскільки, напівпровідники є дуже чутливими до змін умов навколишнього середовища, то їх властивості змінюються зі зміною температури, під дією електричного

та магнітного полів, зовнішнього опромінення і багатьох інших факторів. Тому характеристики напівпровідникових сенсорів та ефективність їх роботи суттєво залежать від природи напівпровідникового матеріалу його чистоти та стійкості. В зв'язку з цим, одним із сучасних напрямків розвитку напівпровідникової електроніки є розробка нових матеріалів, з високою чутливістю електричного опору до змін температури, яку кількісно оцінюють за допомогою температурного коефіцієнта опору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На практиці [1, 4-6] в якості резистивних напівпровідникових матеріалів найчастіше використовують неметали, метали, оксиди металів а також різноманітні композиційні матеріали, які виготовляють методами порошкової металургії при тривалому спіканні. Такі методи є довготривалими, енергоємними і не завжди дозволяють отримати кінцеві продукти високого ступеня чистоти [7-10].

Особливу увагу вчених останнім часом привертають терморезистивні композиційні матеріали [8, 9], в яких електропровідність суттєво залежить від об'ємної концентрації наповнювача. В роботі [8] досліджено терморезистивний матеріал на основі сегнетоелектричної кераміки, проте такий матеріал має обмеження в застосуванні через вузький інтервал робочих температур.

В роботах [5, 8] представлені дані з дослідження резистивних властивостей органічних полімерних матеріалів з електропровідними наповнювачами. Однак такі полімерні композиційні матеріали проявляють нестабільність своїх властивостей після нагрівання та охолодження внаслідок зміни структури термореактивного полімерного компонента та мають вузький температурний діапазон використання.

Відомо [11, 12], що деякі гетероядерні координаційні сполуки володіють напівпровідниковими властивостями і можуть виконувати роль терморезистивного матеріалу для розробки нових високочутливих термо- та магніточутливих сенсорів.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є отримання нового напівпровідникового матеріалу на основі гетероядерної координативної сполуки, та дослідження впливу магнітного поля і температури на його фізичні властивості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відомо, що гетероядерні координаційні сполуки, які містять у своєму складі атоми металів різної природи володіють різноманітними електричними, магнітними, оптичними та іншими властивостями і знаходять широке застосування на практиці [13-17]. В твердому стані такі сполуки здатні проявляти електропровідні властивості, які залежать від природи металів, що входять до їх складу та лігандного оточення і можуть змінюватися в широких межах від діелектрика до напівпровідника. Особливий інтерес викликають напівпровідникові властивості гетероядерних β -дикетонатів, які містять в своєму складі метали d- та p- елементів періодичної системи. Деякі з цих сполук володіють високою чутливістю до змін температури тому можуть бути використані

в якості напівпровідникового матеріалу на практиці для виготовлення терморезисторів.

З метою отримання нового напівпровідникового матеріалу була розроблена методика синтезу гетероядерного μ -пентаізопропоксо(трикупрум(II), бісмут(III))тетраацетилацетонату (I), такого складу: $[\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{OC}_3\text{H}_7\text{-i})_5(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_4]$, де $\text{OC}_3\text{H}_7\text{-i} = \text{CH}_3\text{-CH}(\text{O}^-)\text{-CH}_3$; $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2 = \text{H}_3\text{C-S}(\text{O})\text{-CH-C}(\text{O}^-)\text{-CH}_3$.

Гетероядерну координаційну сполуку (I) синтезували в трьохгорлій термостійкій круглодонній колбі з оборотним водяним холодильником та пристроєм для перемішування, яка розміщена на водяній бані за такою методикою: наважки солей 2,54 г (8 ммоль) бісмут (III) хлориду і 3,24 г (24 ммоль) безводного купрум (II) хлориду розчиняли в 240 мл 2-пропанолу при нагріванні на водяній бані ($\sim 60^\circ\text{C}$) та безперервному перемішуванні. Після повного розчинення солей до отриманого прозорого розчину додавали 3,40 мл (32 ммоль) пентан-2,4-діону. Далі в реакційну суміш невеликими порціями, за допомогою піпетки, додавали піперидин до $\text{pH} = 9$ і продовжували перемішування та нагрівання ($\sim 60^\circ\text{C}$) впродовж 1,5 години. Після додавання протонно-акцепторного реагенту спостерігали утворення блакитного дрібнокристалічного осаду, кількість якого збільшувалась при охолодженні реакційної маси. Через годину після повного охолодження до кімнатної температури осад фільтрували на скляному фільтрі за допомогою насоса Комовського, промивали метиловим спиртом, діетиловим етером і висушували у вакуум-ексикаторі. Практичний вихід продукту 7,33 г, що складає 84% від теоретично обчисленого. Синтезована координаційна сполука (I) – дрібнокристалічний порошок блакитного кольору, добре розчинний у диметилформаміді, малорозчинний в етиловому спирті, гідролізується у воді.

Для підтвердження ідентичності гетероядерного μ -пентаізопропоксо-(трикупрум(II), бісмут(III))тетраацетилацетонату (I) проведено елементний аналіз і встановлено, що до його складу входять атоми двох різних за природою металів, які знаходяться у співвідношенні: $\text{Cu} : \text{Bi} = 3:1$. Експериментальні дані з визначення вмісту атомів Карбону та Гідрогену дозволили встановити для виділеної координаційної сполуки (I) таку брутто формулу: $\text{Cu}_3\text{BiC}_{35}\text{O}_{13}\text{H}_{68}$. Для встановлення структурної будови виділеного гетероядерного β -дикетонату проведено дослідження магнітних властивостей за кімнатної температури, аналіз ІЧ-спектрів у твердому стані та термодес-

риватографічне дослідження в інтервалі температур 20-900 °С. На основі отриманих даних для даної координаційної сполуки (I) запропоновано поліядерну будову, в якій три атоми Купруму(II) та один атом Бісмуту(III), поєднані за допомогою аніонів 2-пропанолу, які виконують роль місткових лігандів, крім того до складу однієї молекули комплексу входять чотири аніона монодепротонованих молекул пентан-2,4-діону.

Молярна маса отриманої гетероядерної координаційної сполуки $[\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{OC}_3\text{H}_7\text{-i})_5(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_4]$ (I), де $\text{OC}_3\text{H}_7\text{-i} = \text{CH}_3\text{-CH}(\text{O}^-)\text{-CH}_3$; $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2 = \text{H}_3\text{C-C}(\text{O})\text{-CH-C}(\text{O}^-)\text{-CH}_3$ дорівнює 1096,00 г/моль, а кількість валентних електронів для однієї молекули – 289.

Для дослідження електричної провідності синтезованого порошкоподібного матеріалу сполуки (I) за допомогою пресу виготовлено експериментальний зразок у формі циліндра об'єм якого дорівнює $19,20 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$, а маса – 0,17 г. Густина досліджуваного матеріалу пресованого зразка розраховано за формулою (1):

$$\rho = m / v = 8,854 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3 \quad (1)$$

де ρ – густина речовини; m – маса експериментального циліндричного зразка; V – об'єм експериментального циліндричного зразка.

За формулою (2) здійснено розрахунок маси однієї молекули досліджуваної речовини (I):

$$m_0 = M / N_A = 182,060 \cdot 10^{-20} \text{ кг}, \quad (2)$$

де m_0 – маса однієї молекули сполуки; M – молярна маса сполуки (I); N_A – число Авогадро.

Загальну кількість молекул сполуки (I) в об'ємі досліджуваного циліндричного зразка розраховано за формулою (3)

$$N_{\text{мол}} = m / m_0 = 9,34 \cdot 10^{13} \text{ молекул}, \quad (3)$$

де $N_{\text{мол}}$ – загальна кількість молекул в експериментальному зразку; m – маса експериментального циліндричного зразка; m_0 – маса однієї молекули отриманої сполуки (I).

Загальну кількість валентних електронів в експериментальному зразку досліджуваного матеріалу розраховано за формулою (4):

$$N = 289 \cdot N_{\text{мол}} = 2699,26 \cdot 10^{13}. \quad (4)$$

Концентрацію носіїв заряду розраховано при температурі 423 К з використанням формули (5):

$$n = N / V = 1,3867 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}, \quad (5)$$

де N – загальна кількість валентних електронів в експериментальному зразку; V – об'єм експериментального зразка.

Дослідження температурної залежності електропровідності отриманого матеріалу μ -пентаізопроропко(трикупрум(II), бісмут(III))тетраацетилацетонату (I) показало, що при збільшенні температури від 303 К до 423 К його питомий опір суттєво зменшується від $5 \cdot 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до $8 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, це свідчить про наявність напівпровідникових властивостей. На основі отриманих експериментальних даних обчислено питому провідність дослідженого матеріалу, при $T_1 = 303 \text{ К}$ – $\sigma_1 = 2,00 \cdot 10^{-10} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$, а для $T_2 = 423 \text{ К}$ – $\sigma_2 = 0,125 \cdot (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$. За формулою (6), з використанням експериментальних даних, проведено розрахунок забороненої зони для отриманого напівпровідникового матеріалу:

$$\Delta E = \frac{k \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} = 2,9852 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,865 \text{ eВ}, \quad (6)$$

де T – абсолютна температура; σ – питома провідність матеріалу; k – стала Больцмана.

Виходячи з розрахунків отримали підтвердження, що даний матеріал є напівпровідником з носіями струму обох знаків.

Ширина забороненої зони та формула залежності концентрації носіїв заряду напівпровідника від температури, дає можливість отримати графік залежності концентрації носіїв заряду від температури, який в логарифмічному вигляді подано на рис. 1.

Як видно з рис. 1, концентрація носіїв заряду в діапазоні температур від 273 К до 493 К зростає від $8,7 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ до $1,9 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$.

Розраховувавши сталу Холла при 303 К отримали:

$$R_H = 1 / nq = 28400 \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}, \quad (7)$$

де q – заряд електрона; n – концентрація носіїв заряду.

Формула (8) дає можливість обчислювати квантову сталу Холла:

$$R_{\text{кв} H} = -3\pi / 8nq = -33170,2 \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}. \quad (8)$$

Об'єднавши рівняння залежності концентрації носіїв заряду від температури та формулу (8), вивели формулу залежності константи Холла від температури (9):

$$R_{\text{кв} H} = -\frac{3\pi}{8qn_0} \cdot e^{\frac{\Delta E}{kT}}. \quad (9)$$

На основі формули (9) побудовано логарифмічну залежність квантової константи Холла від температури (рис. 2):

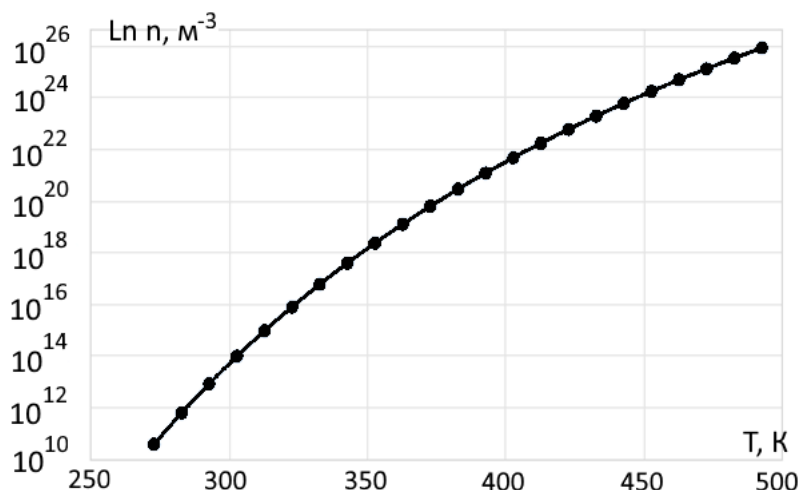


Рис. 1. Логарифмічна залежність концентрації носіїв заряду від температури

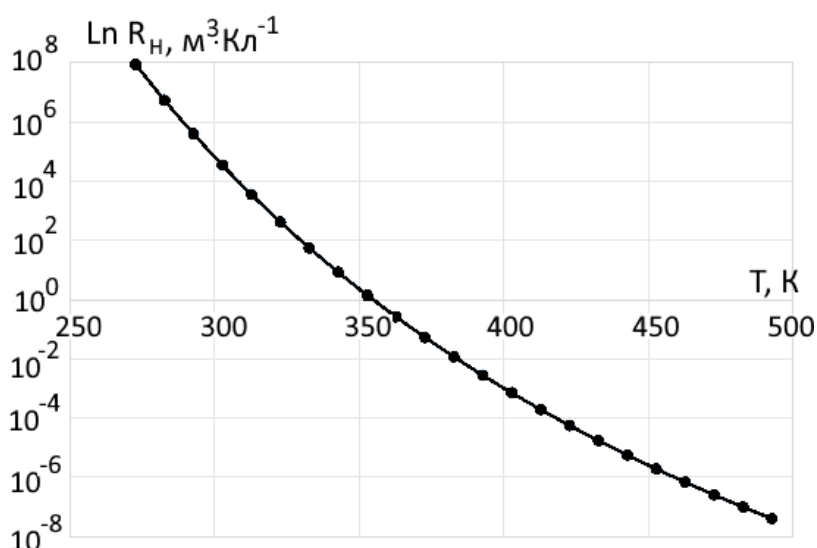


Рис. 2. Логарифмічна залежність квантової константи Холла від температури

Як видно з графіка (рис. 2), величина квантової константи Холла для отриманої координаційної сполуки (I) при зростанні температури від 273 до 493 К зменшується від $8,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$ до $3,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$.

З експериментальних даних питомого опору, при 303 К, $\rho = 5 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, для знаходження рухливості носіїв заряду, була розрахована питома провідність $\sigma = 2,0 \cdot 10^{-10} \text{ сім}$.

$$\mu_n = R_H \cdot \sigma. \quad (10)$$

Для квантового випадку визначимо рухливість носіїв заряду:

$$\mu_n = R_{\text{кв}H} \cdot \sigma = 6,63 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}. \quad (11)$$

Підставляючи в (11) залежність питомої провідності від температури та константи Холла від температури було визначено, що рухливість носіїв заряду не залежить від температури і рівна $\mu = 6,63 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / (\text{В} \cdot \text{с})$.

Розрахунок залежностей Холлівської напруженості електричного поля всередині напівпровідника, з розмірами $1,6 \times 1,6 \times 7,5 \text{ мм}$, що виникає під дією магнітного поля всередині напівпровідника подано на рисунку 3.

Як видно з графіка в діапазоні від 10 до 200 мТ напруженість збільшується від 0,301 до 6,02 В/м, а в діапазоні від 100 до 1000 мТ графік набуває лінійного характеру і напруженість змінюється від 6,02 В/м до 30,12 В/м.

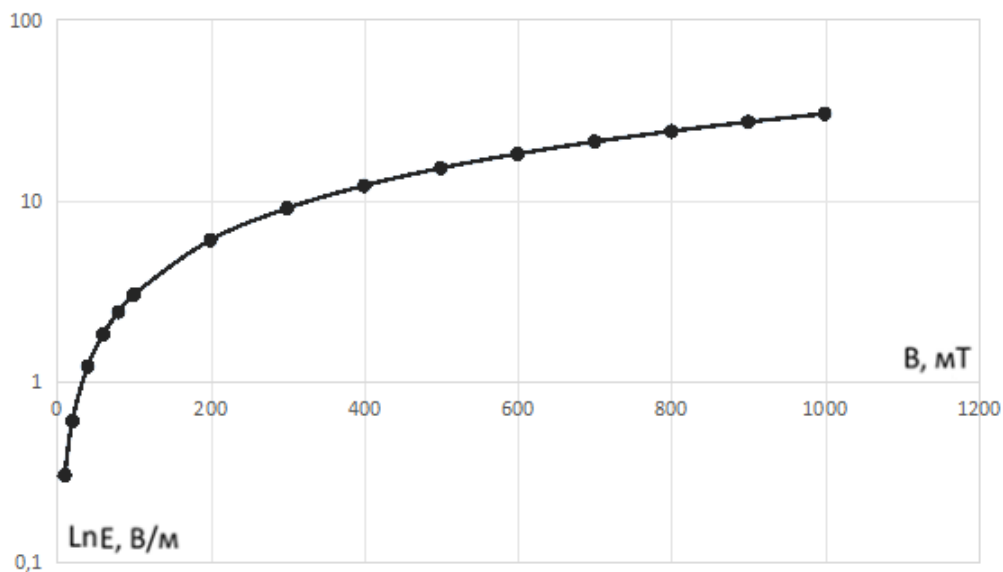


Рис. 3. Логарифмічна залежність напруженості електричного поля всередині напівпровідника від індукції магнітного поля

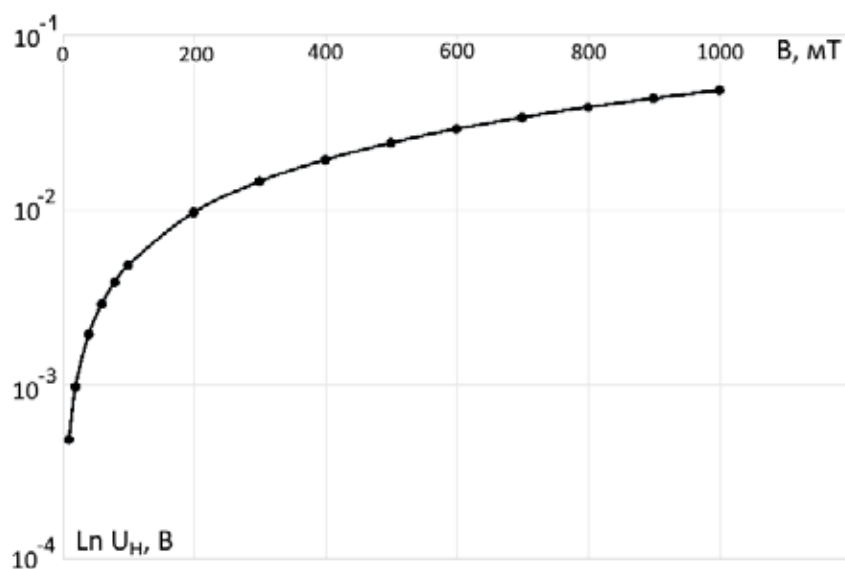


Рис. 4. Логарифмічна залежність напруги Холла від індукції магнітного поля

Відповідна залежність спостерігається і для напруги Холла. Логарифмічну залежність напруги Холла від індукції магнітного поля подано на рисунку 4.

З графіка видно, що в діапазоні від 10 до 200 мТ напруга Холла зростає від $4,8 \cdot 10^{-4}$ до $9,6 \cdot 10^{-3}$ В, а від 200 до 1000 мТ – Холлівська напруга зростає від $9,6 \cdot 10^{-3}$ В до $4,8 \cdot 10^{-2}$ В.

Висновки. Розроблено методику синтезу нового напівпровідникового матеріалу, виділено його в твердому стані, доведено його склад та будову. Досліджено вплив температури та магнітного поля на його фізичні параметри. Вста-

новлено температурну залежність електропровідності отриманого матеріалу μ -пентаізопропо ксо(трикупрум(II), бісмут(III))тетраацетилацетонату і показано, що при збільшенні температури від 303 К до 423 К його питомий опір суттєво зменшується від $5 \cdot 10^{11}$ Ом·см до $8 \cdot 10^2$ Ом·см, що свідчить про наявність напівпровідникових властивостей. На основі отриманих експериментальних даних обчислено питому провідність дослідженого матеріалу, при $T_1 = 303$ К – $\sigma_1 = 2,00 \cdot 10^{-10}$ (Ом·м) $^{-1}$, а для $T_2 = 423$ К – $\sigma_2 = 0,125$ (Ом·м) $^{-1}$. Встановлено, що інтервал робочих температур складає від +273 до +493 К, причому розкла-

дання хімічної сполуки відбувається з 523 К, концентрація носіїв заряду зростає від $8,7 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ при 273 К до $1,97 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$ при 493 К, при цьому константа Холла при збільшенні температури від

273 К до 493 К зменшується від $8,5 \cdot 10^7 \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$ до $3,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Кл}^{-1}$, напруга Холла в діапазоні магнітного поля від 0 до 1000 мТ змінюється від $4,82 \cdot 10^{-4}$ до $4,82 \cdot 10^{-2} \text{ В}$.

Список літератури:

1. Strikha V. I. Semiconductor sensors – semiconductor electronics promising direction. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2021. V.18. № 2. P. 48–53. URL: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2021.2.235212>. (date of access: 21.01.2025).
2. Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник / В.М. Ванько, Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець та ін.; за ред. Є.С. Поліщука, В.М. Ванько. Львів: Нац. ун-т Львів. Політехніка, 2015. 580 с.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Сенсори тиску і магнітного поля: монографія. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. 207 с.
4. Мельник О.Л., Ярош Я.Д., Балицька Н.О., Соловійов А.В. Температурний коефіцієнт опору композиційних систем «кераміка-вуглець» з нанорозмірними вуглецевими наповнювачами. *Вісник Житомирського агроєкологічного університету*. 2017. № 2(16), Т. 1. С. 171–179.
5. Hongfeng X., Pengyang D., Lisong D., Jiazhen S. LDPE/carbon black conductive composites: Influence of radiation crosslinking on PTC and NTC properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2002. № 13. P. 2742–2749. DOI: 10.1002/app.10720. (date of access: 21.01.2025).
6. Hongfeng X., Pengyang D., Lisong D., Jiazhen S. LDPE/carbon black conductive composites: Influence of radiation crosslinking on PTC and NTC properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2002. № 13. P. 2742–2749. DOI: 10.1002/app.10720. (date of access: 21.01.2025).
7. Hongfeng X., Pengyang D., Lisong D., Jiazhen S. LDPE/carbon black conductive composites: Influence of radiation crosslinking on PTC and NTC properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2002. № 13. P. 2742–2749. DOI: 10.1002/app.10720. (date of access: 21.01.2025).
8. L. Jingrong, C. Xiangfeng, L. Wei, C. Guohua. The piezoresistive behaviors of polyethylene/foliated graphite nanocomposites. *European Polymer Journal*. 2006. № 5. P. 1015–1021. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2005.11.026. (date of access: 21.01.2025).
9. Мельник О.Л., Ярош Я.Д., Серов В.В., Отаманський В.В. Вплив високодисперсних вуглецевих наповнювачів на теплові властивості композиційних систем «кераміка-вуглець». *Вісник Житомирського агроєкологічного університету*. 2017. № 1(58). С. 259–270.
10. Strümpfer R. Polymer composite thermistors for temperature and current sensors. *Journal of Applied Physics*. 1996. Vol. 80, № 11. P. 6091–6096. DOI: 10.1063/1.363682. (date of access: 21.01.2025).
11. Мельник О.Л., Гутніченко О.А. Температурний коефіцієнт опору графіт-керамічних композиційних матеріалів з кварцевим наповнювачем різної дисперсності. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2014. № 4. С. 102–114. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456-789/5734>. (дата звернення: 21.01.2025).
12. Мельничук П.П., Мельник О.Л. Вплив неіоногенної поверхнево активної речовини Тритон Х-305 на основні фізико-механічні властивості композитних матеріалів кераміка-нанопластинки графіту. *Вісник Житомирського державного університету*. 2014. № 4. С. 44–52.
13. Osadchuk O., Martyniuk V., Osadchuk I., Semenova O., Sydoruk T., Evseeva M. The impact of temperature and magnetic field on physical field on physical parameters of the strontium-containing heterometallic coordination compound of copper(II). In: *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. (Lviv-Slavske, Ukraine 25–29 February 2020). Lviv-Slavske, 2020. P. 511–515. URL: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235485>. (date of access: 21.01.2025).
14. Semenov A., Martyniuk V., Evseeva M., Osadchuk O., Semenova O., Yushchenko T. Electrical Properties of the (Copper, Dysprosium)-Containing Complex Compound. 2024. In: *6th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. ICNBME 2023. IFMBE Proceedings*, 2024. Vol. 91. P. 31–40 Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42775-6_4. (date of access: 21.01.2025).
15. J.-W. Yang, Y.-M. Tian, J. Tao, P. Chen, H.-F. Li, Y.-Q. Zhang, P.-F. Yan, W.-B. Sun, Modulation of the Coordination Environment around the Magnetic Easy Axis Leads to Significant Magnetic Relaxations in a Series of 3d-4f Schiff Complexes. *Inorganic Chemistry Journal*. 2018. 57. P. 8065–8077. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.8b00056. (date of access: 21.01.2025).
16. Osadchuk O., Martyniuk V., Semenova O., Semenov A., Martyniuk H., Sydoruk T. Physical parameters of the synthesized semiconductor material based on a heterometallic complex compound of copper (II) with N,N'-Bis(Salicylidene)Semicarbazide. In: *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. IEEE, 22–26 February 2022, Lviv-

Slavske, Ukraine (2022) P. 432–435. URL: <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766980>. (date of access: 21.01.2025).

17. Semenov A.O., Martyniuk V.V., Evseeva M.V., Osadchuk O.V., Semenova O.O. Electrical properties of the nanocomposite (copper, samarium)-containing complex compound. 2022 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng* IOP Conf. Ser. 1254(1). 012029. 2022. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1254/1/012029>. (date of access: 21.01.2025).

Osadchuk O.V., Martyniuk V.V., Evseeva M.V., Martyniuk G.I. INFLUENCE OF TEMPERATURE AND MAGNETIC FIELD ON THE PHYSICAL PARAMETERS OF (COPPER, BISMUTH) CONTAINING β -DIKETONATE

The article is devoted to the study of the influence of temperature and magnetic field on the physical parameters of (copper, bismuth)-containing β -diketonate. The work describes the method of synthesis and isolates a heterometallic coordination compound in the solid state. It was experimentally proven that the obtained compound in a compressed state has semiconductor properties. Anhydrous bismuth (III) and cuprous (II) chlorides and pentane-2,4-dione were used for the synthesis of a heteronuclear coordination compound, the reaction was carried out in a 2-propanol medium with heating. It is shown that the reaction rate of the coordination compound synthesis and its practical yield increases in the presence of a proton-acceptor reagent. The practical yield of the synthesized product was established, which is equal to 84% of the theoretically calculated one. The purity and identity of heteronuclear μ -pentaisopropoxo(tricuprum(II), bismuth(III)) tetraacetylacetonate (I) was confirmed based on elemental analysis data. It was determined that the composition of compound (I) includes atoms of two metals of different nature, which are in the ratio of Cu : Bu = 3:1 and it has the following gross formula: $\text{Cu}_3\text{BiC}_{35}\text{O}_{13}\text{H}_{68}$. A study of magnetic properties at room temperature, analysis of IR spectra in the solid state, and a thermoderivative study in the temperature range of 20-900°C of the isolated heteronuclear β -diketonate was carried out. Based on the obtained data, a polynuclear structure was proposed for this coordination compound. In the compressed state, the influence of temperature and magnetic field on the physical properties of the obtained material based on compound (I) was investigated. The temperature dependence of the electrical conductivity of the obtained μ -pentaisopropoxo(tricuprum(II), bismuth(III)) tetraacetylacetonate was established and it was shown that when the temperature increases from 303 K to 423 K, its resistivity significantly decreases from $5 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ to $8 \cdot 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$, which indicates the presence of semiconductor properties. Based on the obtained experimental data, the specific conductivity of the studied material was calculated, at $T_1 = 303 \text{ K} - \sigma_1 = 2.00 \cdot 10^{-10} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, and for $T_2 = 423 \text{ K} - \sigma_2 = 0.125 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ and the band gap $\Delta E = 1.86 \text{ eV}$ is set. It is proved that the studied material is a semiconductor with current carriers of both signs.

Key words: semiconductor, magnetic field, temperature, induction, heteronuclear complex compounds.

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/08>**Валуйський С.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Гірук Д.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В МЕРЕЖАХ SDN НА ОСНОВІ OPENFLOW

У статті представлено розроблений адаптивний метод балансування навантаження для програмно-визначених мереж (SDN), що базується на використанні OpenFlow. Основна мета цього методу – забезпечення ефективного розподілу трафіку в мережі за рахунок адаптації до змін у її стані в режимі реального часу. Для досягнення цієї мети запропоновано багаторівневий підхід, який передбачає динамічний моніторинг стану каналів зв'язку і вузлів мережі. Це дозволяє вибирати оптимальні маршрути передачі даних з урахуванням поточного завантаження.

Запропонований метод базується на інтеграції OpenFlow із використанням таблиць потоків для маршрутизації трафіку. OpenFlow-контролер забезпечує централізоване управління мережею, моніторинг стану каналів і динамічну оптимізацію маршрутів. Це дозволяє адаптивно реагувати на зміну умов роботи мережі, зокрема при збільшенні навантаження або виникненні вузьких місць.

Метод був протестований у симуляційному середовищі, створеному на основі бібліотек SimPy, NetworkX та NumPy. Для тестування змодельовано багаторівневу SDN-мережу, яка включає комутатори рівня ядра (Core), агрегації (Aggregation) і доступу (Access), а також кінцеві вузли (хости). У процесі тестування розроблений адаптивний метод порівнювався з традиційними методами балансування, такими як хешування та динамічне перенаправлення.

Результати симуляції показали, що запропонований метод значно покращує ефективність мережі. Пропускна здатність адаптивного методу зменшилася на 61.11% у порівнянні з методом хешування, але зросла на 7.69% у порівнянні з динамічним перенаправленням, що свідчить про його кращу продуктивність у сценаріях із рівномірним розподілом трафіку. Час затримки зменшився на 40% у порівнянні з динамічним перенаправленням, але збільшився на 50% у порівнянні з методом хешування. Ефективність розробленого методу на 33.33% більша у порівнянні з методом динамічного перенаправлення і на 69.2% більша у порівнянні з методом хешування.

Основними перевагами розробленого методу є його здатність забезпечувати рівномірний розподіл навантаження, запобігати перевантаженню окремих вузлів і каналів, а також адаптуватися до змін у мережеских умовах. Це робить метод перспективним для застосування в сучасних SDN-мережах, таких як дата-центри, хмарні обчислювальні системи та корпоративні мережі, що вимагають високої продуктивності та надійності.

Розроблений метод відкриває нові можливості для ефективного управління трафіком у складних мережеских інфраструктурах, забезпечуючи гнучкість, масштабованість і стабільність роботи.

Ключові слова: SDN, OpenFlow, балансування навантаження, Python, маршрутизація, адаптивний метод, Google Colab.

Постановка проблеми. Зі зростанням обсягів трафіку в сучасних мережах виникає гостра потреба у впровадженні нових підходів до управління ресурсами. Збільшення кількості користувачів, зростання обсягу даних, що передаються, а також підвищення вимог до швидкості й надійності мережі створюють додаткове навантаження на мережеву інфраструктуру. У таких умовах традиційні методи управління ресурсами мережі виявляються недостатньо ефективними, що призводить до виникнення перевантажень, збільшення затримок і зниження продуктивності.

Програмно-визначені мережі (SDN) пропонують сучасний підхід до вирішення цих проблем, забезпечуючи централізоване управління мережею через використання SDN-контролера [1]. Це дозволяє оптимізувати роботу мережі, забезпечуючи гнучке управління трафіком і полегшуючи впровадження нових функцій. Однак ефективність роботи SDN значною мірою залежить від здатності балансувати навантаження між каналами зв'язку та вузлами мережі. Без ефективного балансування навіть у SDN-мережах можуть виникати перевантаження, які негативно впливають на загальну продуктивність.

Традиційні методи балансування навантаження, такі як статичне хешування або динамічне перенаправлення трафіку, мають свої обмеження. Статичне хешування, наприклад, забезпечує простоту реалізації, але не враховує зміни в умовах роботи мережі. Це може призводити до нерівномірного розподілу навантаження і утворення "гарячих точок". Динамічне перенаправлення трафіку є більш гнучким підходом, однак воно також не завжди відповідає високим вимогам до продуктивності та ефективності в умовах значного навантаження.

Сучасні мережі вимагають адаптивних рішень, які здатні враховувати динамічні зміни в стані мережі, оптимізувати маршрутизацію та забезпечувати рівномірний розподіл трафіку. Це потребує розробки нових підходів до управління ресурсами, які базуються на використанні сучасних технологій і алгоритмів. Розробка таких рішень є важливою не лише для покращення роботи існуючих мереж, а й для забезпечення їхньої масштабованості та відповідності майбутнім вимогам.

Постановка завдання. Метою даної роботи є створення нового методу адаптивного балансування навантаження на основі багаторівневого підходу для програмно-визначених мереж (SDN) із використанням OpenFlow, який враховує особливості динамічної зміни трафіку. Основна

задача методу полягає у забезпеченні ефективного використання мережевих ресурсів шляхом оптимального розподілу навантаження між вузлами та каналами зв'язку [2].

У рамках дослідження передбачено розробку алгоритму, здатного в реальному часі моніторити стан мережі, оцінювати завантаженість каналів і вибирати оптимальні маршрути передачі даних. Особливістю запропонованого методу є використання багаторівневої архітектури, яка дозволяє обробляти великі обсяги трафіку і динамічно адаптувати маршрутизацію відповідно до змін у мережі.

Для перевірки ефективності методу буде проведено моделювання в симуляційному середовищі, яке відображає складну багаторівневу топологію SDN-мережі. У рамках експериментів заплановано оцінити ключові показники, такі як час затримки передачі пакетів, пропускна здатність і рівень використання ресурсів. Отримані результати дозволять порівняти запропонований метод із традиційними підходами, такими як хешування та динамічне перенаправлення, і продемонструвати його переваги.

Цей метод спрямований на вирішення проблеми нерівномірного розподілу трафіку та перевантаження каналів, що особливо важливо для сучасних мереж із великим обсягом даних, таких як хмарні платформи та центри обробки даних. Розробка такого підходу сприятиме підвищенню продуктивності мереж, їхній адаптивності до зовнішніх умов і загальній стабільності роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері програмно-визначених мереж (SDN) зосереджуються на розробці ефективних методів балансування навантаження, оскільки саме від цього залежить продуктивність і надійність роботи мереж. Одним із поширених підходів є хешування, яке приваблює своєю простотою реалізації та низькими вимогами до обчислювальних ресурсів. Завдяки використанню статичних алгоритмів, хешування дозволяє швидко розподіляти трафік між вузлами. Однак основним його недоліком є відсутність гнучкості: метод не враховує змін у завантаженості каналів чи виникнення «гарячих точок», що обмежує його застосування у динамічних середовищах із постійними змінами у трафіку.

Динамічне перенаправлення, навпаки, забезпечує більш адаптивний підхід до балансування навантаження. Цей метод передбачає постійний моніторинг стану мережі та перенаправлення трафіку залежно від актуального завантаження вузлів

і каналів. У теорії, це забезпечує кращий розподіл ресурсів, особливо у випадках нерівномірного трафіку. Однак на практиці ефективність динамічного перенаправлення може значно знижуватися при високому завантаженні каналів, коли рішення про маршрутизацію займають більше часу, а додаткові обчислювальні витрати впливають на продуктивність.

Одним із перспективних напрямів досліджень є розробка адаптивних методів балансування, які враховують кілька параметрів мережі одночасно, таких як завантаженість каналів, доступна пропускна здатність, кількість активних з'єднань тощо. Такі методи дозволяють не лише оптимально розподіляти трафік, але й передбачати можливі перевантаження, приймаючи превентивні заходи для їх запобігання. Інтеграція таких підходів у SDN-мережі може значно підвищити їхню ефективність, забезпечити стабільну роботу в умовах динамічних змін і мінімізувати затримки передачі даних. Принцип роботи адаптивного методу та його реалізацію зображено на рис. 1 та на рис. 2.

Водночас розробка адаптивних методів є складним завданням, оскільки потребує врахування багатьох факторів і розробки алгоритмів, здатних швидко реагувати на зміни. Однак з огляду на постійне зростання обсягів трафіку в сучасних мережах та необхідність підтримки стабільності роботи, дослідження в цьому напрямі залишаються вкрай актуальними і мають важливе практичне значення для майбутнього розвитку технологій SDN.

Виклад основного матеріалу. Розроблений метод балансування навантаження для SDN-мереж базується на декількох ключових принципах, які забезпечують його ефективність, адаптивність і стійкість у складних мережевих середовищах [3]. Метод орієнтований на використання OpenFlow, багаторівневого підходу та динамічного моніторингу, що дозволяє вирішувати завдання розподілу навантаження з урахуванням поточного стану мережі [4].

Перший принцип методу – **моніторинг мережі в реальному часі**. Завдяки OpenFlow контролер отримує інформацію про стан каналів і вузлів, таких як пропускна здатність, затримки, рівень завантаження та кількість активних підключень. Моніторинг виконується з періодичністю у 2 секунди, що забезпечує актуальні дані для прийняття оптимальних рішень щодо маршрутизації. Такий підхід дозволяє виявляти перевантажені ділянки мережі та реагувати на зміну трафіку.

Другий принцип – **багаторівневий підхід до аналізу трафіку**. У моделі SDN-мережі топологія складається з трьох рівнів: Core (ядро), Aggregation (агрегація) та Access (доступ) [5]. На кожному рівні аналізується завантаженість вузлів і каналів. Рівень ядра відповідає за забезпечення високої пропускної здатності для магістрального трафіку, рівень агрегації оптимізує передачу між ядром і рівнем доступу, а рівень доступу забезпечує обслуговування хостів. Такий підхід дозволяє уникати локальних перевантажень і забезпечувати ефективний розподіл навантаження між рівнями. Наприклад, якщо вузли рівня доступу

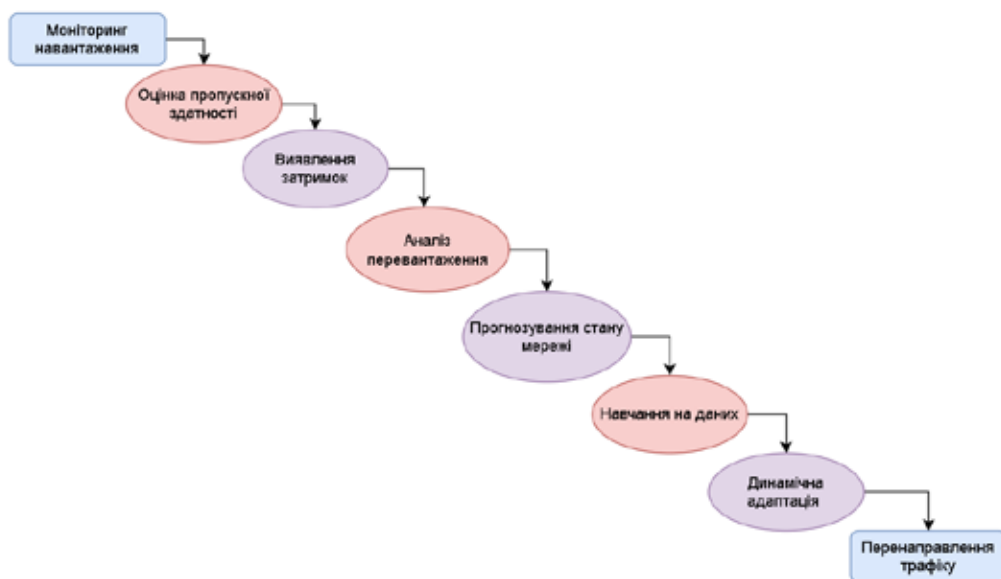


Рис. 1. Схема функціонування адаптивного методу

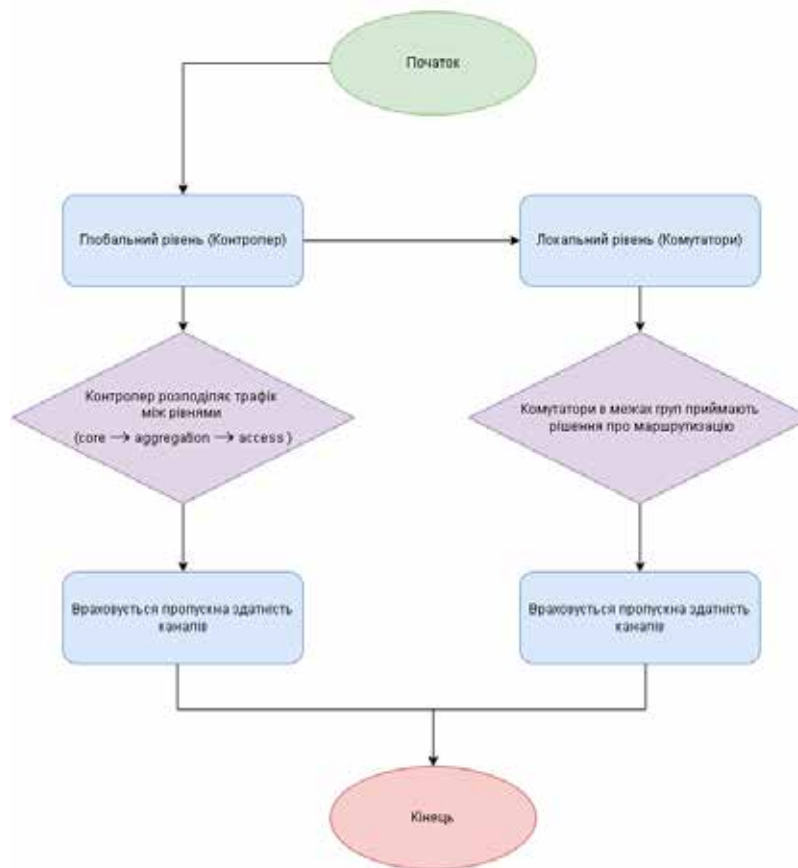


Рис. 2. Блок-схема реалізації адаптивного методу на основі багаторівневого підходу

перенавантажені, трафік перенаправляється через менш завантажені канали ядра.

Третій принцип – **адаптивність методу**. Маршрутизація трафіку здійснюється на основі аналізу поточного стану мережі. Метод обирає найбільш оптимальні маршрути, які мінімізують затримки та забезпечують рівномірний розподіл навантаження між каналами. Це дозволяє уникати перевантаження вузлів і утворення «гарячих точок». Крім того, адаптивність включає можливість швидкої реакції на зміну мережових умов, таких як зростання трафіку або відмова обладнання.

Метод було реалізовано в симуляційному середовищі Google Colab із використанням мови програмування Python 3.10 та бібліотек SimPy, NetworkX і NumPy, що дозволило створити точну модель роботи програмно-визначених мереж (SDN). У рамках симуляції було створено багаторівневу топологію мережі, яка включала 19 вузлів, що виконували різні функції:

- **Рівень Core (ядро)** складався з 2 комутаторів, які забезпечували магістральне з'єднання і високу пропускну здатність для транзитного трафіку між рівнями агрегації.

- **Рівень Aggregation (агрегація)** включав 4 комутатори, які виступали проміжною ланкою між ядром і рівнем доступу, забезпечуючи ефективне розподілення трафіку.

- **Рівень Access (доступ)** складався з 6 комутаторів, до яких були підключені кінцеві вузли – 6 хостів.

- **Контролер SDN** виступав як логічний балансувальник трафіку, керуючи всією мережею за допомогою протоколу OpenFlow.

Симуляція працювала за умов випадкового трафіку, де потоки даних створювалися між вузлами за випадковим принципом із урахуванням гарячих точок – найбільш активних хостів (host_0, host_3, host_4). Цей підхід дозволив змодельовати реалістичний сценарій мережевої діяльності, що включає як рівномірне навантаження, так і локальні перевантаження у вузлах. Тривалість симуляції склала 50 секунд, а розмір кожного пакета був встановлений на рівні 512 байт, що відповідає типовим умовам передачі даних у сучасних мережах.

Основними компонентами скриптів, написаних для симуляції, стали класи **Performance MetricsCollector** та **NetworkSimulator**. Перший клас відповідав за збір метрик продуктивності,

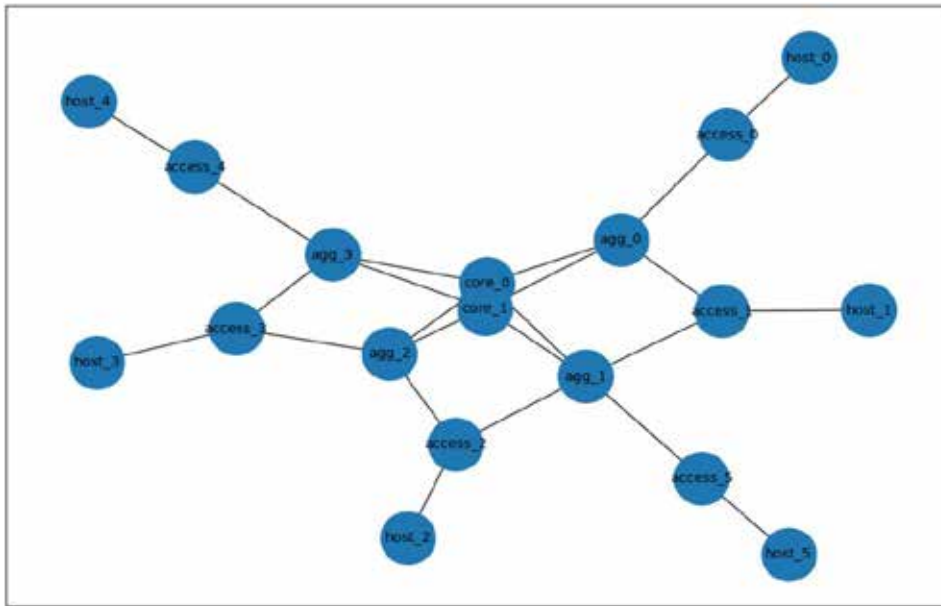


Рис. 3. Топологія симуляції SDN-мережі

таких як середній час затримки, пропускна здатність та ефективність використання ресурсів. Другий клас виконував маршрутизацію пакетів через мережу з урахуванням адаптивного методу.

Метрики продуктивності розраховувалися за допомогою наступних функцій:

1. **record_routing_time()** для збереження часу маршрутизації.
2. **update_channel_load()** для оновлення стану каналів.
3. **calculate_throughput()** для визначення пропускної здатності.
4. **calculate_resource_efficiency()** для аналізу рівномірності завантаження каналів.

Функція **run_simulation_with_metrics** реалізувала симуляцію, в рамках якої генерувалося 10 потоків трафіку між випадковими вузлами. Для кожного потоку використовувався метод **send_packet()**, що включав такі етапи:

- Вибір оптимального маршруту за допомогою контролера.
- Передача пакета через мережу з урахуванням випадкової затримки.
- Оновлення метрик продуктивності.

Для оцінки ефективності було протестовано три методи балансування навантаження: хешування, динамічне перенаправлення та розроблений адаптивний метод на основі багаторівневого підходу. Кожен із методів мав свої особливості:

- Хешування забезпечувало просту маршрутизацію, однак не враховувало поточний стан мережі. Цей метод виявився ефективним за низького навантаження, але його недоліки проявля-

лися в умовах змінного трафіку, коли виникали локальні перевантаження.

– Динамічне перенаправлення забезпечувало більш адаптивний підхід, перенаправляючи трафік залежно від стану каналів, проте в умовах високої завантаженості його ефективність знижувалась через затримки на обробку інформації.

– Адаптивний метод, розроблений у рамках цього дослідження, об'єднував моніторинг у реальному часі, багаторівневий підхід і динамічну маршрутизацію. Метод використовував дані про завантаженість каналів і вузлів для вибору оптимальних маршрутів, що дозволяло уникати перевантаження і підвищувати ефективність використання мережевих ресурсів.

Результати оцінки часу затримки, пропускної здатності та ефективності методів зображено на рис. 4.

Адаптивний метод показав стабільну продуктивність у різних мережевих сценаріях із середнім часом затримки 15 мс – на 40% більше, ніж у хешування (10 мс), але на 40% менше, ніж у динамічного перенаправлення (25 мс). Хоча хешування має найвищу пропускну здатність (180 пакетів/сек) і мінімальну затримку, його статичний характер робить його неефективним у багаторівневих SDN-мережах із динамічним трафіком, що призводить до перевантаження вузлів.

Адаптивний метод, із пропускну здатністю 70 пакетів/сек (на 62% менше, ніж у хешування, але на 8% більше, ніж у динамічного перенаправлення), компенсує це рівномірним розподілом трафіку та уникненням перевантаження. Ефектив-

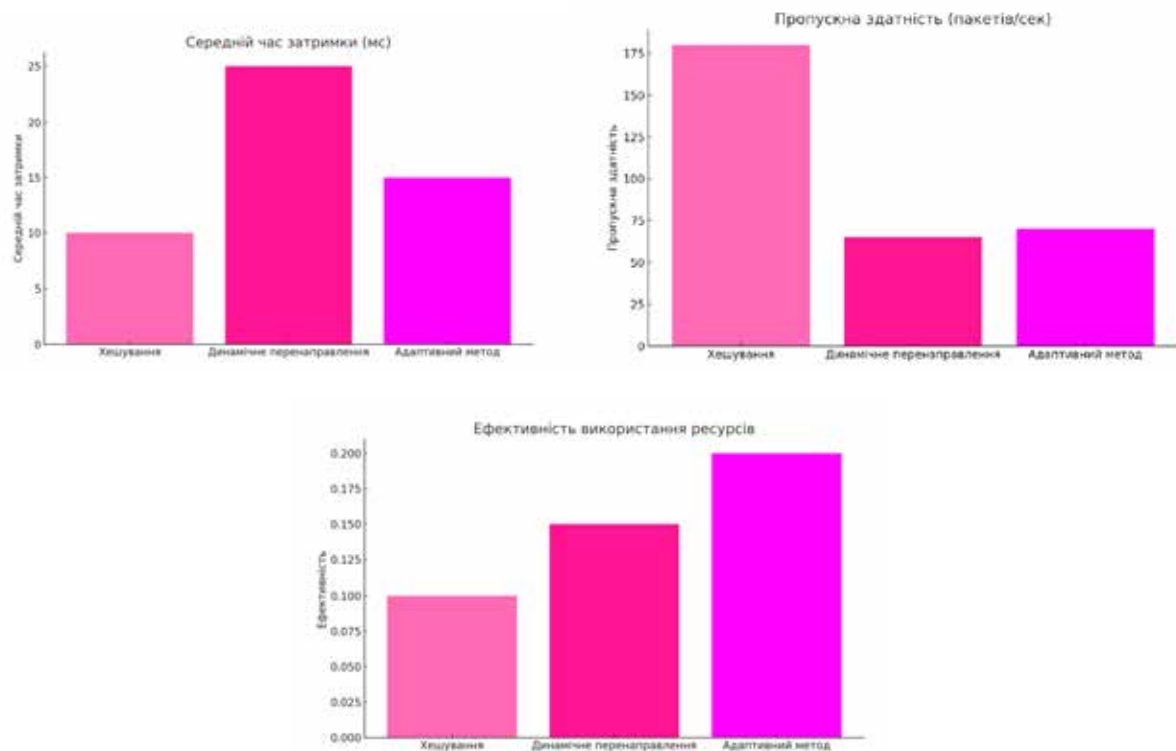


Рис. 4. Графіки порівняння ключових метрик методів

ність методу (0.20) перевищує показники динамічного перенаправлення (0.15) на 33% і хешування (0.10) у два рази, що робить його оптимальним вибором для динамічних SDN-мереж. Це підтверджує його здатність забезпечувати рівномірний розподіл трафіку і уникати «гарячих точок».

Запропонований метод, що базується на моніторингу в реальному часі, багаторівневному аналізі трафіку та адаптивній маршрутизації, демонструє значний потенціал для впровадження у реальні мережі.

Новизна розробленого методу адаптивного балансування навантаження для SDN-мереж полягає в інтеграції сильних сторін традиційних підходів, таких як динамічне перенаправлення трафіку та хешування, з новими принципами, які забезпечують його ефективність та адаптивність у складних мережних умовах.

Однією з ключових особливостей методу є **динамічна адаптація**, яка дозволяє йому реагувати на зміни в мережевому трафіку в режимі реального часу. Завдяки аналізу поточного стану каналів і вузлів мережі метод здатний уникати перевантаження, забезпечуючи оптимальний розподіл потоків між доступними ресурсами. Це забезпечує стабільну роботу навіть в умовах інтенсивного зростання трафіку або несподіваних змін у топології мережі.

Ще однією важливою інновацією є механізм **мінімізації впливу «гарячих точок»**. У мережах із нерівномірним навантаженням гарячі точки можуть створювати вузькі місця, що значно впливає на продуктивність. Розроблений метод враховує гарячі точки при маршрутизації, використовуючи їх пріоритизацію та перенаправлення трафіку через менш завантажені канали. Це дозволяє уникати локальних перевантажень і підтримувати стабільність роботи мережі.

Ще однією унікальною складовою є **автоматичне керування завантаженням**, яке реалізується через алгоритм зниження ваги (decay rate). Цей механізм поступово зменшує вагу каналів із часом, дозволяючи рівномірно перерозподіляти трафік у довгостроковій перспективі. Таким чином, метод запобігає накопиченню трафіку в окремих сегментах мережі, підтримуючи її ефективність навіть у тривалих робочих сесіях.

Метод також відрізняється **інтеграцією сильних сторін існуючих підходів**. Зокрема, він поєднує стійкість та простоту реалізації хешування із гнучкістю динамічного перенаправлення. Однак, на відміну від цих підходів, запропонований метод додає власну логіку оптимізації, яка враховує багаторівневу структуру SDN-мережі. Аналіз і прийняття рішень відбувається на трьох рівнях: Core (ядро), Aggregation (агрегація) та Access

(доступ). Це дозволяє враховувати стан кожного сегмента мережі, забезпечуючи кращий контроль над потоками даних.

Завдяки **комбінованому підходу**, метод дозволяє не лише ефективно управляти поточним навантаженням, але й адаптуватися до змін у мережі, таких як збільшення обсягу трафіку чи зміни у топології. Це забезпечує значні переваги у порівнянні з традиційними алгоритмами, такими як хешування та динамічне перенаправлення, особливо у великих мережах із високими вимогами до продуктивності та стабільності.

Таким чином, новизна розробленого методу полягає в його здатності динамічно адаптуватися до змін у мережі, уникати перевантаження, мінімізувати вплив гарячих точок і забезпечувати високу ефективність використання ресурсів. Це робить його перспективним для впровадження у сучасні SDN-мережі, особливо у сферах із високими вимогами до продуктивності, таких як хмарні сервіси, дата-центри та операторські мережі.

Висновки. У статті представлено новий підхід до балансування навантаження в програмно-визначених мережах (SDN), заснований на адап-

тивному методі з використанням OpenFlow. Розроблений метод враховує динаміку трафіку, забезпечуючи рівномірний розподіл навантаження між вузлами мережі та ефективне використання ресурсів. Наукова новизна полягає у застосуванні багаторівневого аналізу трафіку та автоматичному моніторингу стану каналів, що дозволяє підвищити продуктивність мережі навіть в умовах інтенсивного навантаження.

Результати моделювання у симуляційному середовищі Google Colab підтвердили ефективність запропонованого підходу. **Пропускна здатність** адаптивного методу **зменшилася на 61.11%** у порівнянні з методом хешування, але **зросла на 7.69%** у порівнянні з динамічним перенаправленням, що свідчить про його кращу продуктивність у сценаріях із рівномірним розподілом трафіку. **Час затримки зменшився на 40%** у порівнянні з динамічним перенаправленням, але **збільшився на 50%** у порівнянні з методом хешування. **Ефективність** розробленого методу **на 33.33% більша** у порівнянні з методом динамічного перенаправлення і **на 69.2% більша** у порівнянні з методом хешування.

Список літератури:

1. D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. E. Veríssimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky and S. Uhlig, "Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey," in Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 1, pp. 14-76, Jan. 2015, doi: 10.1109/JPROC.2014.2371999.
2. A. Caric and K. Toivo, "New generation network architecture and software design," in IEEE Communications Magazine, vol. 38, no. 2, pp. 108-114, Feb. 2000, doi: 10.1109/35.819903.
3. I. Grida, B. Yahia, E. Bertin and N. Crespi, "Next/New Generation Networks Services and Management," International conference on Networking and Services (ICNS'06), Silicon Valley, CA, USA, 2006, pp. 15-15, doi: 10.1109/ICNS.2006.77.
4. Qingzhi Liu et al., "Cluster-based flow control in hybrid software-defined wireless sensor networks," Computer Networks, Volume 187, 2021, pp. 2-11, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107788>.
4. X. Shi et al., "An OpenFlow-Based Load Balancing Strategy in SDN," Computers, Materials & Continua, vol. 62, no. 1, pp. 385-398, 2020. <https://doi.org/10.32604/cmc.2020.06418>.

Valuiskyi S.V., Lysenko O.I., Hiruk D.O. LOAD BALANCING METHOD IN SDN NETWORKS BASED ON OPENFLOW

The article presents a developed adaptive load balancing method for Software-Defined Networks (SDN), based on the use of OpenFlow. The main goal of this method is to ensure efficient traffic distribution in the network by adapting to changes in its state in real time. To achieve this goal, a multi-level approach is proposed, which involves dynamic monitoring of the state of communication channels and network nodes. This enables the selection of optimal data transmission routes considering the current load.

The proposed method is based on the integration of OpenFlow with the use of flow tables for traffic routing. The OpenFlow controller provides centralized network management, channel state monitoring, and dynamic route optimization. This allows the network to adaptively respond to changes in operating conditions, particularly during increased load or the occurrence of bottlenecks.

The method was tested in a simulation environment built using the SimPy, NetworkX, and NumPy libraries. A multi-level SDN network was modeled for testing, including switches at the core, aggregation, and access levels, as well as end nodes (hosts). During the testing process, the developed adaptive method was compared to traditional load balancing methods such as hashing and dynamic rerouting.

Simulation results demonstrated that the proposed method significantly improves network efficiency. The throughput of the adaptive method decreased by 61.11% compared to the hashing method but increased by

7.69% compared to dynamic rerouting, indicating better performance in scenarios with evenly distributed traffic. The delay time decreased by 40% compared to dynamic rerouting but increased by 50% compared to the hashing method. The efficiency of the developed method was 33.33% higher compared to the dynamic rerouting method and 69.2% higher compared to the hashing method.

The main advantages of the developed method are its ability to ensure uniform load distribution, prevent overload of individual nodes and channels, and adapt to changes in network conditions. This makes the method promising for use in modern SDN networks, such as data centers, cloud computing systems, and corporate networks that require high performance and reliability.

The developed method opens up new opportunities for efficient traffic management in complex network infrastructures, providing flexibility, scalability, and operational stability.

Key words: SDN, OpenFlow, load balancing, python, routing, adaptive method, Google Colab.

Геращенко А.Ю.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лебедев Д.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ 802.11 ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Стаття присвячена аналізу сучасних методів оптимізації параметрів бездротових мереж стандарту IEEE 802.11 із використанням підходів машинного навчання. Розкрито вплив ключових параметрів мережі, таких як OBSS/PD, пропускна здатність, RSSI та інтерференція, на якість передачі даних. У статті розглянуто існуючі підходи до прогнозування якості сигналу на основі співвідношення сигнал/інтерференція/шум (SINR) із застосуванням алгоритмів штучних нейронних мереж (ANN) та методів адаптивної оптимізації.

З'ясовано, що статичні або емпіричні методи налаштування мереж є недостатньо ефективними в умовах динамічного середовища. Доведено, що використання машинного навчання для прогнозування параметрів мережі дозволяє враховувати змінність середовища передачі даних та забезпечує підвищення продуктивності Wi-Fi. У статті визначено основні недоліки традиційних підходів, зокрема залежність від статичних конфігурацій і низьку адаптивність до змін середовища.

Запропоновано нову систему оптимізації, що використовує нейронну мережу для точного прогнозування SINR та динамічної адаптації параметрів Wi-Fi. Розкрито особливості автоматичної оптимізації, яка підвищує продуктивність мережі, забезпечує стабільність передачі даних та покращує якість обслуговування в реальних умовах. Визначено переваги запропонованого підходу, зокрема зниження впливу інтерференції та підвищення ефективності роботи мережі навіть у складних сценаріях.

У статті сформовано напрями для подальшого вдосконалення, серед яких впровадження багаторівневої оптимізації параметрів, інтеграція енергоефективних рішень та використання новітніх методів машинного навчання. Зроблено висновок, що адаптивна оптимізація мереж Wi-Fi з використанням штучного інтелекту є перспективним напрямом для підвищення продуктивності бездротових мереж стандарту IEEE 802.11.

Ключові слова: Wi-Fi, SINR, нейронна мережа, оптимізація параметрів, машинне навчання, 802.11.

Постановка проблеми. Основною метою оптимізації параметрів бездротових мереж є забезпечення стабільної та високоякісної передачі даних, особливо в умовах динамічних змін середовища. Чим ефективніше налаштовуються параметри мережі у відповідь на ці зміни, тим краще використовуються її ресурси та забезпечується якість обслуговування (QoS). Це підкреслює важливість розробки адаптивних підходів до управління параметрами мережі стандарту 802.11.

На сьогодні існує чимало підходів до оптимізації параметрів Wi-Fi мереж, таких як OBSS/PD, RSSI, interference тощо. Однак, більшість з них базуються на статичних або емпіричних налаштуваннях, які не враховують постійних змін середовища, таких як взаємні перешкоди між пристроями чи зміна розташування користувачів. Це

приводить до недостатньої ефективності мережі та втрати продуктивності.

У межах цього дослідження буде запропоновано новий підхід, що базується на використанні нейронної мережі для прогнозування параметра SINR (Signal-to-Interference-and-Noise Ratio), який є ключовим для оцінки якості каналу передачі даних. На основі отриманих прогнозів реалізується адаптивна оптимізація таких параметрів мережі для підвищення її продуктивності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх років значна увага дослідників була приділена застосуванню методів машинного навчання (ML) для оптимізації продуктивності Wi-Fi мереж, стандартизованих у рамках IEEE 802.11. Сучасні модифікації стандартів, такі як Wi-Fi 6 (802.11ax) [1] та Wi-Fi 7 (802.11be)

[2], пропонують розширені функціональні можливості, але також ускладнюють налаштування мереж через багатопараметричність. Застосування ML забезпечує ефективне управління цими складними системами, пропонуючи підхід до нелінійної оптимізації мережевих параметрів і покращення продуктивності.

По-перше, основною задачею застосування ML для управління доступом до каналу є мінімізація колізій при спільному доступі до каналів. Зокрема, такі алгоритми, як Q-навчання [3] та Deep Q-Networks [4], дозволяють динамічно адаптувати параметри вікна конфліктів (CW), зменшуючи час очікування та кількість зіткнень. Наприклад, механізми на базі RL, такі як iQRA, показують значне підвищення пропускної здатності в умовах густо розташованих точок доступу, одночасно підтримуючи низькі затримки.

По-друге, ML широко використовується для оптимізації налаштувань фізичного рівня, вибору параметрів модуляції та кодування (MCS), що є ключовими для адаптації швидкості передачі даних до змінних умов мережі. Використання алгоритмів штучних нейронних мереж (ANN) [5] дозволяє швидко передбачати оптимальні параметри, що призводить до підвищення пропускної здатності мережі в мобільних сценаріях. Також для динамічної адаптації значень коротких захисних інтервалів (SGI) [6] використовуються алгоритми онлайн-навчання, що дозволяють враховувати флуктуації сигналу.

По-третє, покращення ефективності агрегації кадрів [7], як-от A-MSDU та A-MPDU, має критичний вплив на баланс між передатною спроможністю і помилками передачі. Методи ML, такі як алгоритми на основі дерев рішень і випадкових лісів, використовуються для визначення оптимального розміру кадру залежно від умов мережі. Це дозволяє зменшити кількість повторних передач та покращити загальну пропускну здатність.

Розглянуті підходи демонструють значні переваги використання ML для покращення продуктивності Wi-Fi мереж. Основними перевагами є адаптивність до змінних умов мережі, здатність до автоматизованої оптимізації параметрів та підвищення загальної ефективності. Недоліками є необхідність великих обчислювальних ресурсів, особливо для навчання складних моделей, та потреба у більш реалістичному моделюванні для врахування мобільності користувачів і багаторівневого управління.

На сучасному етапі досліджень актуальним є створення рішень, які забезпечують інтеграцію

машинного навчання у реальні мережі з урахуванням змін середовища, енергоефективності та вимог до затримок. Це дозволить впровадити адаптивні технології, що підвищують продуктивність Wi-Fi мереж нового покоління.

Постановка завдання. На основі проведеного аналізу визначено ключові параметри, які потребують оптимізації, та сформульовано технічні вимоги до моделі нейромережі:

1. Розробити модель для прогнозування SINR на основі параметрів мережі. Модель повинна враховувати основні фактори, що впливають на якість каналу передачі даних у Wi-Fi мережах, зокрема OBSS/PD, throughput, RSSI, та interference. Використання нейронної мережі дозволить реалізувати точний прогноз SINR у динамічних середовищах.

2. Реалізувати механізм адаптивної оптимізації параметрів Wi-Fi. Після прогнозування SINR модель повинна вибирати найкращі значення параметрів (наприклад, OBSS/PD) для забезпечення максимального SINR.

3. Розробити програмний прототип системи. Прототип повинен містити інтерфейс для введення вхідних параметрів (OBSS/PD, throughput, RSSI тощо) та прогнозування SINR.

Виклад основного матеріалу. Проаналізувавши існуючі підходи до оптимізації параметрів бездротових мереж стандарту 802.11, пропонується інтелектуальна система, що дозволяє ефективно прогнозувати параметри SINR і здійснювати адаптивну оптимізацію мережевих налаштувань. Розроблена система орієнтована на покращення продуктивності Wi-Fi мереж у реальних умовах, враховуючи динамічні зміни середовища. Запропонований підхід базується на використанні нейронних мереж для прогнозування параметрів та алгоритмів адаптивної оптимізації.

Розроблена система забезпечує процес оптимізації параметрів бездротових мереж, включаючи:

- Прогнозування значення SINR на основі вхідних параметрів мережі (OBSS/PD, throughput, interference, RSSI).

- Автоматичне налаштування параметрів мережі для забезпечення максимальної продуктивності.

- Інтеграцію з реальними мережами для роботи в умовах високого навантаження.

Основні етапи роботи системи:

1. Збір даних і формування вхідної інформації. Користувач вводить параметри мережі. Це можуть бути:

- OBSS/PD – поріг виявлення пакетів у перекриваючихся BSS.

- Throughput – пропускна здатність мережі.
- Interference – рівень перешкод між точками доступу.
- RSSI – потужність сигналу, що приймається пристроєм.

Ці дані формують вхідний файл, що перевіряється на коректність і подається на обробку для форматування його у формат, зручний для навчання нейромережі.

2. Прогнозування параметра SINR

На основі вхідних даних нейронна мережа прогнозує значення SINR, використовуючи такі кроки:

- Обробка вхідних параметрів де вхідні дані масштабуються та нормалізуються.
- Прогнозування нейронною мережею, яка складається з трьох прихованих шарів із функціями активації ReLU, що передбачає значення SINR для заданої конфігурації.
- Виведення прогнозованого значення SINR та передача його на наступний етап для аналізу та оптимізації.

3. Адаптивна оптимізація мережевих параметрів

Розроблений алгоритм вибирає найкращу конфігурацію параметрів мережі, яка забезпечує максимальне значення SINR. Процес оптимізації складається з таких кроків:

- Генерується набір можливих конфігурацій параметрів OBSS/PD, RSSI, interference та throughput (рис. 1).

```
# Приклад конфігурацій для оптимізації
sample_configs = pd.DataFrame({
    'OBSS/PD': [-64, -62, -63],
    'throughput': [20, 25, 30],
    'interference': [-70, -80, -90],
    'RSSI': [-60, -55, -50]
})
```

Рис. 1. Приклад конфігурацій для оптимізації

- Кожна конфігурація подається на вхід моделі для прогнозування SINR.
 - Вибирається конфігурація з максимальним прогнозованим SINR.
- ## 4. Виведення результатів і рекомендацій
- Система відображає:
- Обрану конфігурацію параметрів (рис. 2).
 - Графік втрат (loss) під час навчання.

Графік (рис. 3) демонструє динаміку функції втрат (Loss) для навчального (синя лінія) та валідаційного (помаранчева лінія) наборів даних протя-

```
Найкраща конфігурація для оптимізації каналу передачі даних:
OBSS/PD      -62.00000
throughput    25.00000
interference  -80.00000
RSSI          -55.00000
Predicted SINR 1.31782
Name: 1, dtype: float64
```

Рис. 2. Відображення обраної конфігурації параметрів

гом 100 епох навчання моделі. Зменшення Training Loss свідчить про те, що модель поступово покращує свої прогнози на тренувальних даних. Стабілізація Validation Loss після певної кількості епох вказує на те, що модель досягає оптимальної узгодженості з невідомими даними. Відсутність значного розриву між лініями свідчить про те, що модель не схильна до перенавчання.

- Графік середньої абсолютної помилки (MAE).

Графік показує середню абсолютну помилку (MAE) для тренувального (синя лінія) та валідаційного (помаранчева лінія) наборів даних під час навчання моделі. Зменшення MAE з часом вказує на те, що модель поступово покращує точність своїх прогнозів. Мала різниця між тренувальним і валідаційним MAE свідчить про гарну узгодженість моделі з невідомими даними, без ознак перенавчання.

- Графік реального і прогнозованого значення SINR з лінією ідеального прогнозування.

Графік (рис. 5) демонструє співвідношення між реальними (по осі X) і прогнозованими (по осі Y) значеннями SINR. Червона лінія ($y=x$) позначає ідеальні передбачення. Близькість точок до цієї лінії свідчить про високу точність моделі. Розсіювання точок показує відхилення від ідеального прогнозу. Більшість точок розташовані близько до червоної лінії, особливо в середньому діапазоні значень (20–40 SINR). Це свідчить, що модель добре прогнозує значення SINR у цьому діапазоні. У нижніх значеннях SINR (менше 20) та у верхніх значеннях (понад 45) є трохи більша варіативність, що свідчить про складність цих діапазонів для моделі.

- Гістограму абсолютних похибок прогнозування.

Графік (рис. 6) демонструє гістограму абсолютних похибок (absolute errors), які є різницею між реальними значеннями SINR і передбаченими значеннями, у модулі:

$$\text{Absolute Error} = |\text{Real SINR} - \text{Predicted SINR}|$$

Велика частота похибок лежить у межах 0–5, що свідчить про те, що модель здебільшого перед-



Рис. 3. Графік втрат під час навчання

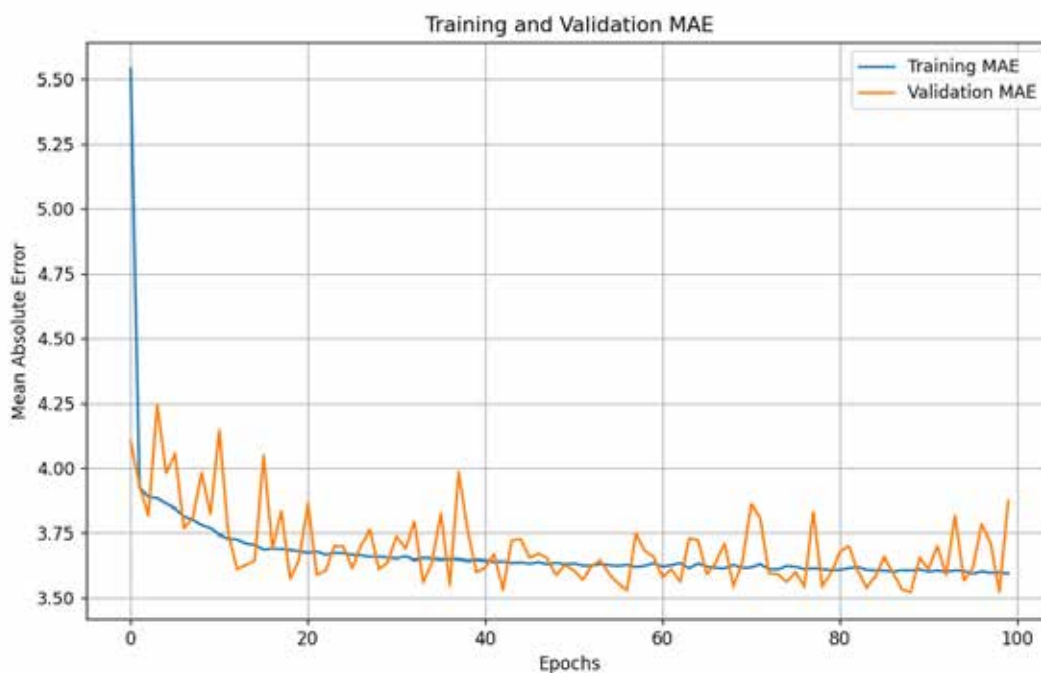


Рис. 4. Графік MAE

бачає SINR із малою помилкою, це вказує на високу якість роботи моделі для більшості зразків.

- Графік реальних і прогнозованих значень SINR.

Графік (рис. 7) порівнює реальні значення SINR (синя лінія) із прогнозованими моделлю (помаранчева лінія) для перших 100 зразків. Близькість обох ліній свідчить про точність прогнозування.

Невеликі розбіжності демонструють похибки моделі, але загальна тенденція зберігається.

Користувач може проаналізувати результати оптимізації та прийняти рішення щодо застосування рекомендованих налаштувань.

Функціональна організація системи

Розроблена система функціонує у двох основних режимах:

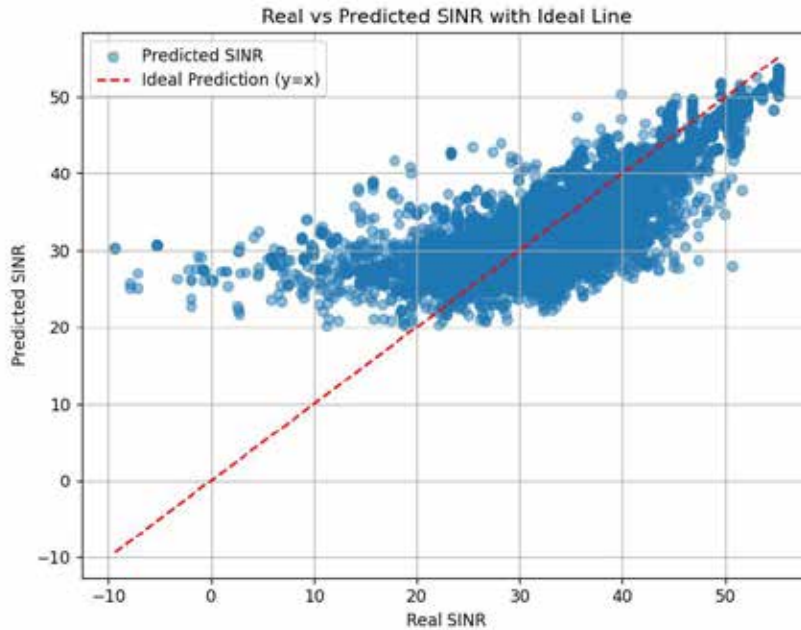


Рис. 5. Реальні та прогнозовані значення SINR з лінією ідеального прогнозу

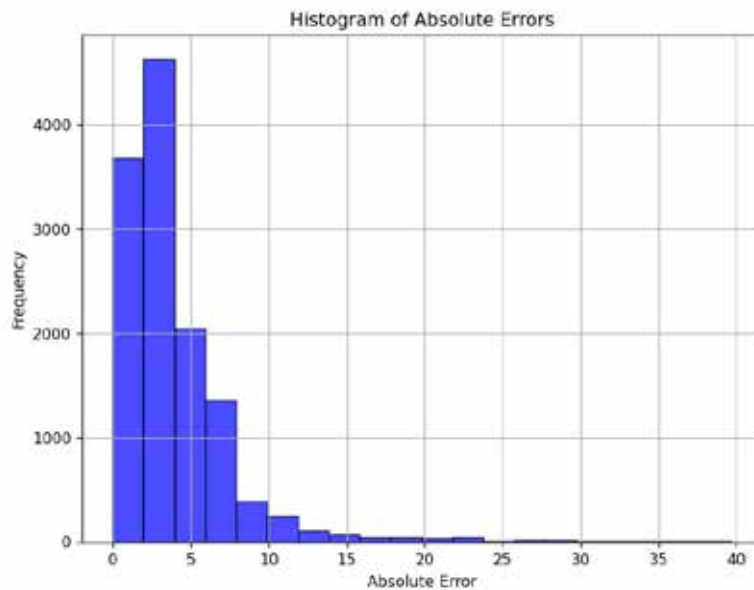


Рис. 6. Частота абсолютних похибок

1. Прогнозування параметрів: Користувач подає вхідні дані, і система прогнозує SINR для заданої конфігурації.

2. Оптимізація параметрів: Система генерує набір конфігурацій, прогнозує для кожної SINR і обирає оптимальну.

Основні компоненти системи:

1. Модуль збору даних. Відповідає за введення та попередню обробку параметрів користувачем. Забезпечує перевірку коректності даних.

2. Нейронна мережа для прогнозування SINR. Складається з трьох шарів що мають 128, 64 та 32 нейрони відповідно. Використовується функція втрат MSE та оптимізатор Adam. Навчена на симуляційних даних із набору formatted_training_data.csv, що являють собою метрики результатів симуляції різних сценаріїв мереж стандарту 802.11ax (WiFi 6) у симуляторі Komondor.

3. Модуль оптимізації реалізує механізм перебору та оцінки можливих конфігурацій та вико-

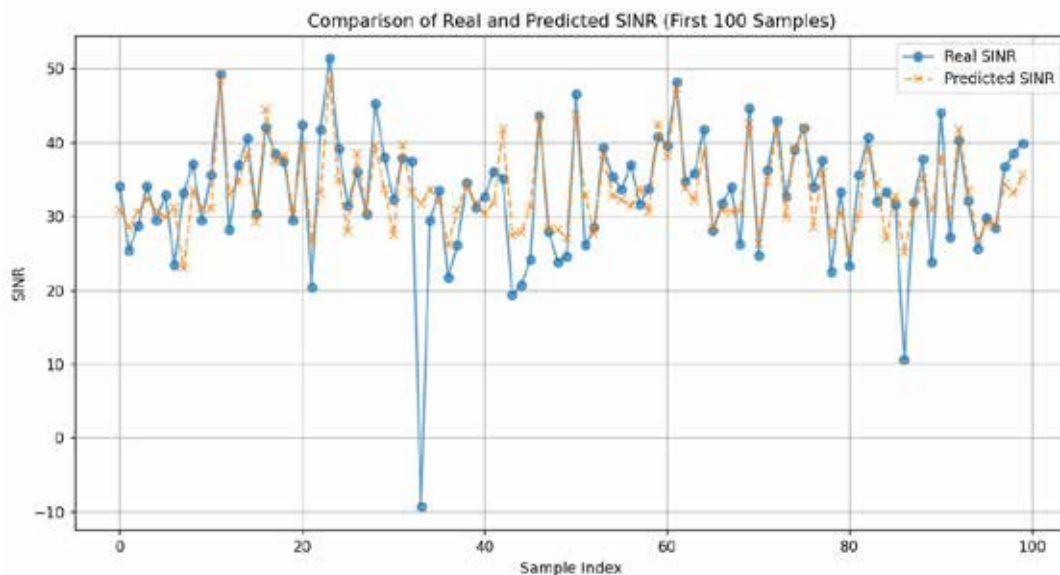


Рис. 7. Реальне і прогнозоване значення SINR

ристовує прогнозовані значення SINR для вибору найкращої конфігурації.

4. Інтерфейс відображення результатів містить: графіки прогнозування, таблиці з вибраними параметрами, інформацію щодо поточного стану мережі.

Принцип роботи алгоритму:

1. Користувач вводить вхідні параметри мережі (OBSS/PD, throughput, RSSI, interference).

2. Модель прогнозує SINR для заданої конфігурації.

3. Генерується набір конфігурацій, і для кожної прогнозується SINR.

4. Вибирається конфігурація з максимальним SINR.

5. Результати відображаються користувачу у вигляді рекомендацій та графіків.

Переваги створеної системи

- Система автоматично підлаштовується до змін середовища.

- Може працювати з різними конфігураціями параметрів мережі.

- Забезпечує покращення SINR, що безпосередньо впливає на якість зв'язку та каналу передачі.

Розроблена система є інструментом для оптимізації параметрів Wi-Fi мереж і має потенціал для впровадження у сучасні мережеві інфраструктури.

Висновки. Проведено аналіз наявних підходів до оптимізації параметрів бездротових мереж стандарту IEEE 802.11, у ході якого встановлено, що більшість існуючих рішень не враховують динамічних змін середовища, що обмежує їх ефективність.

Наведені приклади досліджень продемонстрували, що хоча машинне навчання має значний потенціал для оптимізації мереж, поточні моделі часто потребують значних обчислювальних ресурсів і не завжди придатні для реального використання.

На основі порівняльного аналізу визначено, що адаптивні підходи до управління параметрами, такі як використання нейронних мереж для прогнозування SINR, мають найвищий потенціал для покращення продуктивності Wi-Fi мереж. Розроблена система відповідає цим вимогам та демонструє високу точність і адаптивність.

Напрямок подальших досліджень є впровадження запропонованого підходу у реальні мережі Wi-Fi, враховуючи мобільність користувачів, енергоефективність системи та багаторівневу оптимізацію параметрів для забезпечення максимальної продуктивності і стабільності мереж нового покоління.

Список літератури:

1. Wi-Fi 6. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_6
2. Wi-Fi 7. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_7
3. F. Wilhelmi, B. Bellalta, C. Cano, and A. Jonsson, "Implications of decentralized Q-learning resource allocation in wireless networks," in Proc. IEEE 28th Annu. Int. Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC), 2017, pp. 1–5.

4. A. Kumar, G. Verma, C. Rao, A. Swami, and S. Segarra, "Adaptive contention window design using deep Q-learning," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. (ICASSP), 2021, pp. 4950–4954.
5. S. Khastoo, T. Brecht, and A. Abedi, "NeuRA: Using neural networks to improve WiFi rate adaptation," in Proc. 23rd Int. ACM Conf. Model. Anal. Simul. Wireless Mobile Syst., New York, NY, USA, 2020, pp. 161–170.
6. R. Karmakar, S. De, A. Ghosh, T. Adhikari, and P. Jain, "S2-GI: Intelligent selection of guard interval in high throughput WLANs," in Proc. 11th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. (ICCCNT), 2020, pp. 1–7.
7. D. Skordoulis, Q. Ni, H.-H. Chen, A. P. Stephens, C. Liu, and A. Jamalipour, "IEEE 802.11n MAC frame aggregation mechanisms for next-generation high-throughput WLANs," IEEE Wireless Commun., vol. 15, no. 1, pp. 40–47, Feb. 2008.

Herashchenko A.Yu., Lebedev D.Yu. TECHNOLOGY FOR PREDICTING THE PARAMETERS OF 802.11 WIRELESS NETWORKS FOR ADAPTIVE OPTIMIZATION

The article is devoted to the analysis of modern methods for optimizing the parameters of IEEE 802.11 wireless networks using machine learning approaches. The influence of key network parameters, such as OBSS/PD, throughput, RSSI, and interference, on the quality of data transmission is revealed. The article reviews existing approaches to signal quality prediction based on the signal/interference/noise ratio (SINR) using artificial neural network (ANN) algorithms and adaptive optimization methods.

It has been found that static or empirical methods of network tuning are not effective enough in a dynamic environment. It is proved that the use of machine learning to predict network parameters allows to take into account the variability of the data transmission environment and improves Wi-Fi performance. The article identifies the main disadvantages of traditional approaches, including dependence on static configurations and low adaptability to environmental changes.

A new optimization system is proposed that uses a neural network to accurately predict SINR and dynamically adapt Wi-Fi parameters. The features of automatic optimization are revealed, which increases network performance, ensures data transmission stability, and improves the quality of service in real conditions. The advantages of the proposed approach are determined, in particular, reducing the impact of interference and increasing network efficiency even in complex scenarios.

The article identifies areas for further improvement, including the introduction of multi-level parameter optimization, integration of energy-efficient solutions, and the use of the latest machine learning methods.

It is concluded that adaptive optimization of Wi-Fi networks using artificial intelligence is a promising direction for improving the performance of IEEE 802.11 wireless networks.

Key words: Wi-Fi, SINR, neural network, parameter optimization, machine learning, 802.11.

Єсич Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебедев Д.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ЗАВАД У БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ НА БАЗІ СТАНДАРТІВ 802.11 В РАМКАХ СИМУЛЯТОРА NS3

Стаття присвячена розробці та реалізації програмного модуля для моделювання інтерференційних завад у бездротових мережах, що базуються на стандартах 802.11, у межах симулятора NS-3. У статті розкрито основні принципи моделювання завад, включно з аналізом фізичних та програмних аспектів взаємодії сигналів у бездротових мережах. Визначено ключові недоліки існуючих інструментів, таких як NS-3 та OMNeT++, зокрема складність налаштувань, відсутність динамічного управління параметрами завад і недостатня підтримка рандомізації параметрів завад. Запропоновано новий підхід, що спрямований на усунення цих обмежень через використання спеціалізованого скрипту, який структурує процес моделювання завад.

У статті детально розкрито функціональні можливості розробленого скрипту, що дозволяє інкапсулювати параметри завад у вигляді окремих класів. Такий підхід забезпечує спрощення процесу налаштування параметрів інтерференційних завад, зокрема цільності спектральної потужності, ширини спектра, кількості джерел завад, а також управління їхнім динамічним зміненням у реальному часі. Наведено приклади сценаріїв тестування, які демонструють коректність функціонування розробленого модуля за різних умов, зокрема динамічної зміни параметрів, впливу просторового розташування джерел завад та їхньої інтенсивності.

*У статті визначено, що розроблений програмний модуль дозволяє дослідникам детально аналізувати вплив інтерференційних завад на продуктивність мережі. Це включає оцінку параметрів каналу передачі даних, зокрема пропускну здатності, затримок та рівня втрат сигналу. Розроблений модуль значно спрощує тестування методів мінімізації та уникнення інтерференційних завад, таких як динамічний розподіл каналів, алгоритми планування частот та адаптації швидкості передачі даних. У статті запропоновано два основні класи, *MultipleInterferenceHelper* та *MultipleInterferenceNode*, які значно спрощують управління джерелами завад та їх інтеграцію в сценарії моделювання. Визначено, що використання цих класів дозволяє автоматизувати налаштування завад і забезпечує більшу гнучкість у налаштуванні сценаріїв симуляції.*

Запропонований модуль є потужним інструментом для розробки нових алгоритмів оптимізації радіоресурсів. Його використання дозволяє забезпечити більш реалістичне тестування бездротових систем у переважаних частотних діапазонах, що особливо актуально для мереж стандарту 802.11.

Ключові слова: безпроводні мережі, якість каналу передачі даних, інтерференція, моделювання інтерференційних завад, ефект загасання, стандарт 802.11, адаптація швидкості передачі, NS-3.

Постановка проблеми. Симуляція завад у бездротових мережах є складним завданням через багатогранність і динамічність деяких сценаріїв. Такі фактори, як різноманіття середовищ розповсюдження сигналів, мобільність вузлів мережі, а також спектральна вибірковість завад, суттєво ускладнюють моделювання. Інструменти симуляції завад, що надаються такими потужними мережевими симуляторами, як OMNeT++ [1] та NS-3

[2], мають високий рівень гнучкості. Водночас, їх налаштування є доволі складним завданням і вимагає значних допрацювань для забезпечення реалістичності моделювання спектру. Це стосується як забезпечення смугового розподілу завад у частотному спектрі, так і динаміки змін потужності під час симуляції.

Постановка завдання. Демонстрація нового модуля в ns-3 для моделювання інтерференцій-

них завад для вирішення зазначених викликів у статті представлено скрипт, що демонструє приклад надбудови над наявними механізмами моделювання завад у симуляторі **ns-3**. Запропонований скрипт структурує процес налаштування параметрів завад, об'єднуючи їх в окремий клас, що забезпечує гнучкість і зручність у роботі. Скрипт дозволяє швидко та ефективно налаштовувати такі параметри джерел завад, як щільність спектральної потужності (PSD) [3], ширина спектра завад, і кількість джерел завад. Окрім того, у рамках скрипту реалізовано функціонал для динамічної зміни параметрів завад під час симуляції. Зокрема, передбачено можливість генерації випадкових значень PSD відповідно до нормального розподілу, що задається користувачем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Запропонований модуль підвищує ефективність налаштувань завад в симуляторі **ns-3** і значно спростить процес розробок у галузі бездротових мереж. Даний скрипт є гарним прикладом оптимізації налаштувань моделювання завад та дає змогу проводити детальне тестування методів зменшення завад в бездротових мережах на базі стандарту 80211 [4]. Зокрема таких як динамічний розподіл каналів і алгоритми планування каналів, алгоритмів динамічної зміни частотних каналів [5, 6, 7]. Цей інструмент надає дослідникам і інженерам мереж надійну платформу для оптимізації бездротових систем, і забезпечення кращого співіснування у перевантажених частотних діапазонах.

Огляд існуючих інструментів та методів моделювання завад. Моделювання завад є критично важливим компонентом симуляцій бездротових мереж, і для цього широко використовуються такі інструменти, як **ns-3**, **OMNeT++** та **QualNet**. Ці симулятори надають потужні платформи для проектування та аналізу бездротових систем зв'язку, включаючи можливість моделювання сценаріїв завад. Наприклад, **ns-3** має вбудовану підтримку моделювання спектру, що дозволяє користувачам симулювати завади за допомогою пристроїв, що враховують спектральні характеристики, і моделей втрат сигналу. Аналогічно, **OMNeT++** забезпечує детальне моделювання завад через розширення, такі як **INET** [8] і **SimuLTE** [9].

Попри ці можливості, традиційні інструменти часто вимагають значного ручного налаштування для реалізації сценаріїв завад. Це включає налаштування щільності спектральної потужності

(PSD), конфігурацію ширини каналу та управління частотно-часовою динамікою джерел завад.

Виклад основного матеріалу. Обмеження традиційних підходів. Хоча існуючі інструменти є потужними, вони мають низку обмежень при роботі з динамічними сценаріями завад:

- Складність налаштування. Створення реалістичних сценаріїв завад потребує глибоких знань базових фреймворків.

- Обмежена підтримка змін параметрів завад під час симуляції.

- Недостатня рандомізація. в рамках базового функціоналу моделювання завад немає механізмів для забезпечення випадкових змін завад.

Обґрунтування необхідності нового підходу до моделювання завад.

Виявлені обмеження підкреслюють необхідність створення більш гнучкого та зручного для користувача рішення для моделювання завад. Новий модуль має вирішити ці проблеми шляхом:

- Інкапсуляції параметрів завад. Надання спеціальних класів для спрощення конфігурації та управління джерелами завад та спрощення налаштування видів типових завад.

- Динамічної адаптації. Забезпечення можливості змінювати параметри завад під час симуляції.

- Ймовірнісного моделювання. Додавання підтримки рандомізації та ймовірнісних змін PSD.

- Зручності використання. Зменшення складності налаштування і часу на підготовку.

Запропонований модуль у **ns-3**, як описано у цій статті, покликаний усунути ці недоліки, за допомогою організації моделювання завад у цілісну структуру з розширеним функціоналом.

Архітектура модуля.

Модуль складається з двох основних класів: **MultipleInterferenceHelper** та **MultipleInterferenceNode**. По своїй суті клас **MultipleInterferenceNode** репрезентує заваду а **MultipleInterferenceHelper**, це допоміжний клас, який відповідає за алокацію **MultipleInterferenceNode**. Діаграма класів зображена на рисунку 1.

MultipleInterferenceHelper. Клас **MultipleInterferenceHelper** слугує головним інтерфейсом для управління усіма створеними завадами. Його основна роль полягає в алокації оновлень для вузлів завад.

Атрибути:

- **interferenceVector**: вектор, який зберігає всі створені вузли завад.

- **updatePeriod**: період між оновленнями стану завад.

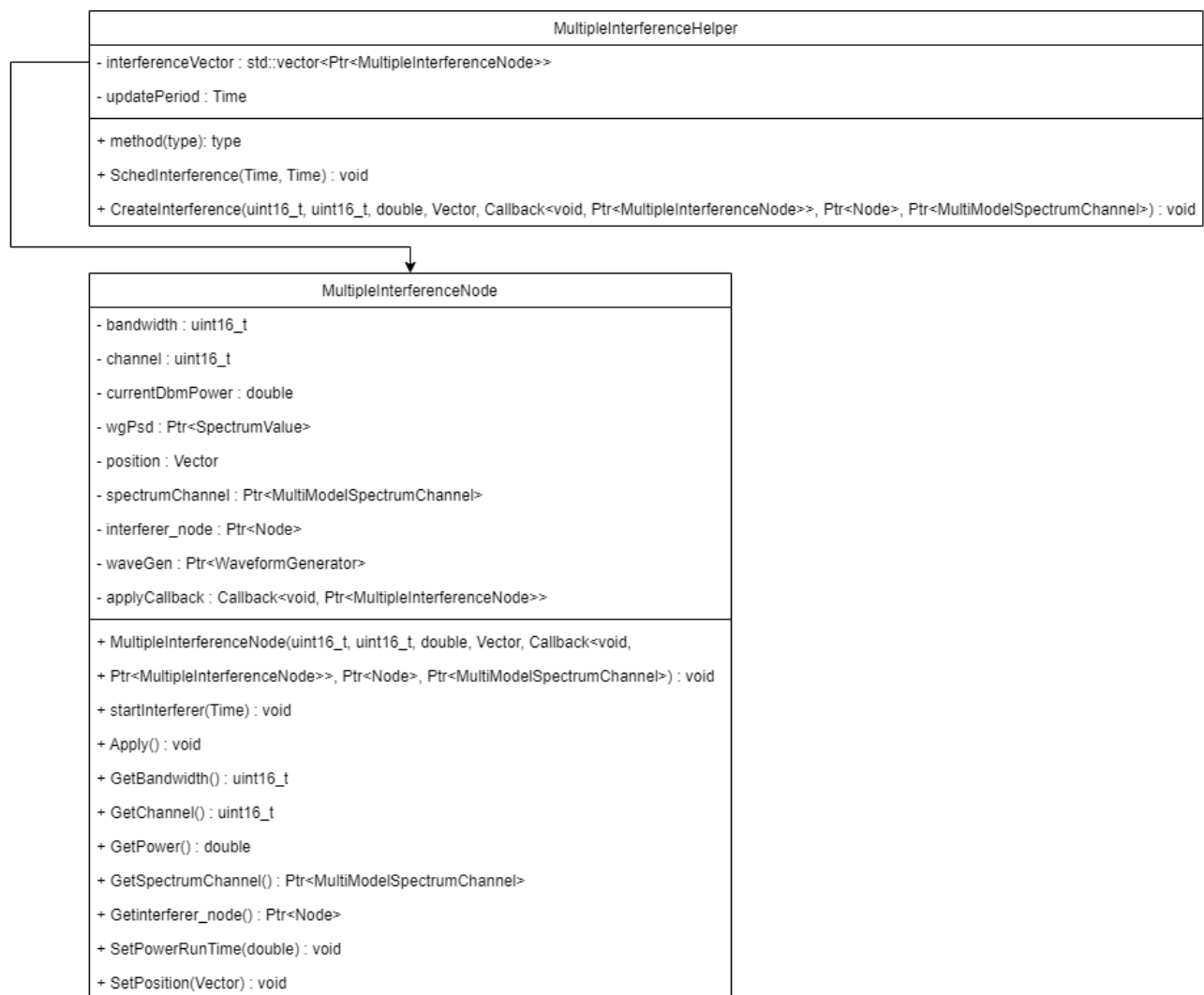


Рис. 1. Діаграма класів які є основою модуля

Методи:

- SchedInterference: задає параметри періодичних оновлення усіх вузлів завад в симуляції.
- CreateInterference: створює новий вузол завади з заданими параметрами та додає його до вектора interferenceVector.

MultipleInterferenceNode. Клас MultipleInterferenceNode представляє окреме джерело завад у симуляції. Він інкапсулює всі властивості та поведінки, пов'язані з джерелом завад.

Атрибути:

- bandwidth: ширина смуги частот джерела завади.
- channel: номер каналу, на якому працює вузол завади.
- currentDbmPower: поточна потужність джерела завади в дБм.
- wgPsd: спектральна щільність потужності (Power Spectral Density) для генератора сигналу.

- position: тривимірний вектор, що описує позицію вузла.

- spectrumChannel: об'єкт, що представляє канал розповсюдження сигналу.

- interferer_node: вузол, до якого належить джерело завади.

- waveGen: об'єкт генератора сигналів, пов'язаний із вузлом завади.

- applyCallback: функція, яка викликається для застосування змін до параметрів джерела завади.

Методи:

- MultipleInterferenceNode: конструктор, який ініціалізує вузол завади з заданими параметрами.
- startInterferer: запускає вузол завади із затримкою у часі.

- Apply: застосовує зареєстровану функцію для оновлення параметрів вузла завади.

- GetBandwidth: повертає ширину смуги частот вузла завади.

- **GetChannel**: повертає номер каналу вузла завади.
- **GetPower**: повертає поточну потужність вузла завади.
- **GetPosition**: повертає координати позиції вузла завади.
- **GetSpectrumChannel**: повертає канал, через який передається сигнал вузлом завади.
- **Getinterferer_node**: повертає вузол, до якого прив'язане джерело завади.
- **SetPowerRunTime**: змінює потужність джерела завади під час виконання симуляції.
- **SetPosition**: встановлює нову позицію вузла завади.

Взаємозв'язки компонентів. Клас `MultipleInterferenceHelper` виконує роль центрального контролера, який координує створення та управління кількома екземплярами `MultipleInterferenceNode`. Використання зареєстрованих функцій для оновлення параметрів вузлу завади під час симуляції надає механізм для динамічної поведінки під час виконання, забезпечуючи можливість зміни параметрів вузлу.

Опис структури скрипту.

Для перевірки функціоналу створеного модулю, необхідно налаштувати симуляцію міні-

мальної безпроводової мережі, на базі стандартів 80211 [1], структуру створеного скрипту для тестування модулю зображено на рисунку 2.

Станція та Точка доступу. Ці елементи представляють бездротові вузли в мережі.

Модель частотного спектру. Ця модель симулює розподіл та використання частотних каналів для зв'язку.

Модель розповсюдження радіо сигналу в просторі. Симулює поширення радіохвиль у фізичному середовищі. Це важливо для визначення впливу відстані та перешкод на потужність і якість сигналу.

Модель розташування елементів мережі в просторі. Ця модель визначає просторове розташування вузлів в рамках симуляції.

Модель методів доступу до каналу передачі даних. Симулює стандарт 80211n, та протоколи для спільного використання каналу передачі.

Модель адаптації швидкості передачі даних. Регулює швидкість передачі залежно від поточних умов каналу та якості сигналу

Модель мережевого інтерфейсу. Представляє апаратний і програмний інтерфейс, що використовується для передачі та прийому даних у мережі.

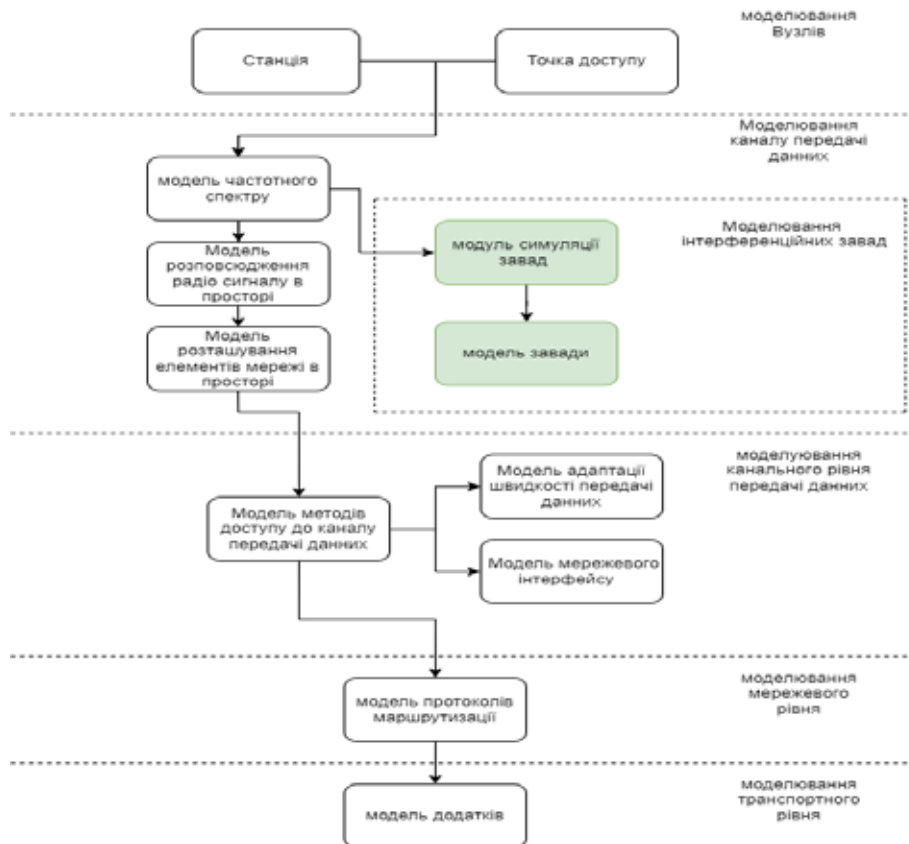


Рис. 2. Структура скрипту створеного для тестування програмного модулю для симуляції інтерференційних завад

Модель протоколів маршрутизації. Симулює протоколи, які використовуються для маршрутизації даних у мережі.

Модель додатків. Представляє генерацію трафіку та комунікацію на рівні додатків.

Ця діаграма демонструє, як симуляція інтегрує ці моделі для тестування та аналізу поведінки бездротової мережі за різних умов із сильним акцентом на інтерференцію та динаміку каналів.

Демонстрація роботи скрипту.

Для демонстрації роботи скрипту прийнято рішення симулювати деякі сценарії роботи програмного модулю для генерації інтерференційних завад. Статистика якості каналу передачі даних, збиратиметься на вузлі базової станції. Демонстрація роботи змодельованої мережі без завад рисунок 3.

При моделюванні дистанція між вузлами була встановлена на 2 метри, а потужність випромінювання – на рівні 17 дБм. У результаті тестування можна спостерігати, що налаштування симуляції виконано коректно. Пропускна здатність каналу передачі даних відповідає найвищому можливому показнику для ширини каналу 20 МГц з втратами на рівні 20%, що є нормою для втрат при розповсюдженні сигналу в просторі.

Демонстрація впливу налаштованої завади на якість передачі сигналу без впливу моделі розташування мережі, та моделі просторового розповсюдження на заваду рисунок 4.

В рамках даного сценарію, при моделюванні інтерференційної завади, модель розповсюдження

завади в просторі не використано. Це зроблено для демонстрації працездатності налаштувань потужності завади. Без урахування розповсюдження завади, потужність сигналу завади на приймачах дорівнює потужності випромінювання завади без врахування дистанції між генератором завади та вузлами мережі. У результаті демонстрації видно, що зконфігуровану потужність коректно відображено як рівень шуму на вузлі базової станції.

Демонстрація сценарію створення завади яка змінює своє значення під час симуляції згідно виставлених параметрів. Для демонстрації даного сценарію, початковий рівень потужності випромінювання завади виставлений в -75 дБм, для подальших змін завади в часі налаштовано адаптацію потужності з використанням нормального випадкового розподілу. Параметри генератора випадкових чисел наступні: середнє значення -75 дБм, стандартне відхилення 5 дБм. Результати симуляції можна спостерігати на рисунку.

Запуск симуляції з вище зазначеним параметрами, зображено на рисунку 5.

Зміна параметрів завади згідно встановленим параметрам генератору випадкових чисел.

У процесі симуляції було продемонстровано динамічну зміну потужності інтерференційної завади згідно з заданими параметрами. Початковий рівень потужності випромінювання завади складав -75 дБм. У подальшому, значення потужності змінилось під час симуляції за допомогою генератора випадкових чисел із нормальним.

```
dmytro@LAPTOP-FQFV6I1L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run scratch/channel_hopping.cc
[0/2] Re-checking globbed directories...
[2/2] Linking CXX executable ../build/scratch/ns3.43-channel_hopping-debug
InterferenceHelper instance created.
wifiType: ns3::SpectrumWifiPhy distance: 2m; time: +1e+10ns; TxPower: 17dBm
the current average noise is 0 changing the channel to 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 36
  Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB)      Chan      BW
          57      81226      -35.7864      -93.966      58.1795         36      20MHz
dmytro@LAPTOP-FQFV6I1L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$
```

Рис. 3. Демонстрація результатів симуляції першого сценарію використання

```
dmytro@LAPTOP-FQFV6I1L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run scratch/channel_hopping.cc
[0/2] Re-checking globbed directories...
[2/2] Linking CXX executable ../build/scratch/ns3.43-channel_hopping-debug
InterferenceHelper instance created.
wifiType: ns3::SpectrumWifiPhy distance: 2m; time: +1e+10ns; TxPower: 17dBm
wgPsd : 5e-18 integrated DbmPower: 1e-10
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 36, DbmPower: -70 at location: (0, 0, 0)
Scheduling interference update to start at: 0.002 seconds, with a period of: 0 seconds.
Starting interferer on channel 36 with current DbmPower: -70
the current average noise is 0 changing the channel to 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 36
  Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB)      Chan      BW
          52      74804      -35.7864      -70.0165      34.2301         36      20MHz
dmytro@LAPTOP-FQFV6I1L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$
```

Рис. 4. Демонстрація результатів симуляції другого сценарію використання

```

dmytro@LAPTOP-FQV611L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run scratch/channel_hopp
[0/2] Re-checking globbed directories...
[2/2] Linking CXX executable ../build/scratch/ns3.43-channel_hopping-debug
InterferenceHelper instance created.
wifiType: ns3::SpectrumWifiPhy distance: 2m; time: +2e+10ns; TxPower: 17dBm
wgPsd : 1.58114e-18 integrated DbmPower: 3.16228e-11
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 36, DbmPower: -75 at location: (0, 0, 0)
Scheduling interference update to start at: 0.002 seconds, with a period of: 4 seconds.
Starting interferer on channel 36 with current DbmPower: -75
the current average noise is 0 changing the channel to 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 36

```

Рис. 5. Демонстрація запуску скрипту в рамках сценарію 3

```

Updating all interferers...
Applying changes to interferer on channel: 36 with current DbmPower: -75
Applying callback for interferer on channel: 36 with DbmPower: -75
Setting DbmPower of interferer on channel: 36 to: -73.8405
The current average noise is -74.9789dBm changing the noise generator power
Interference update rescheduled with period: 4 seconds.

```

Рис. 6. Демонстрація зміни параметрів завади

```

InterferenceHelper instance created.
wifiType: ns3::SpectrumWifiPhy distance: 2m; time: +2.2e+10ns; TxPower: 17dBm
wgPsd : 5e-18 integrated DbmPower: 1e-10
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 36, DbmPower: -70 at location: (0, 0, 0)
wgPsd : 1.58114e-18 integrated DbmPower: 3.16228e-11
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 40, DbmPower: -75 at location: (0, 0, 0)
wgPsd : 5e-19 integrated DbmPower: 1e-11
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 44, DbmPower: -80 at location: (0, 0, 0)

```

Рис. 7. Демонстрація алокації усіх каналів

```

the current average noise is 0 changing the channel to 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 36
  Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB)      Chan      BW
      50      52271      -35.7864      -70.8165      34.2301      36      20MHz
the current average noise is -70.8165 changing the channel to 44
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 44
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 44
  Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB)      Chan      BW
      53      103457      -35.7864      -79.7592      43.9727      44      20MHz

```

Рис. 8. Демонстрація зміни каналу

```

changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
  Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB)      Chan      BW
      52      74804      -35.7864      -65.7927      30.0063      36      20MHz

```

Рис. 9. Демонстрація результату симуляції четвертого сценарію використання

В рамках даного сценарію створено дві окремих завад які розташовані на наступних частотних каналах: 36, 40, 44 та мають відповідні значення потужності випромінювання сигналу завад -70 -80, результат симуляції зображено на рисунках 7 та 8.

Результати симуляції демонструють коректність роботи налаштувань завад: на кожному з частотних каналів рівень шуму на вузлах мережі відповідає заданим параметрам потужності випромінювання.

Демонстрація впливу розташування джерела інтерференційних завад на рівень шуму при отриманні

сигналу базовою станцією. В рамках даного сценарію джерело завад додано до моделі просторового розповсюдження сигналу. Результати симуляції зображено на рисунку 9.

Результати симуляції демонструють, що додавання джерела інтерференційної завади до моделі просторового розповсюдження сигналу впливає на рівень шуму, що отримує базова станція. Адже потужність завади не відповідає рівню шуму який отримує базова станція.

Висновки. У процесі дослідження розроблено програмний модуль для моделювання інтерференційних завад у бездротових мережах

на основі стандарту 802.11, інтегрований у симулятор NS-3. Представлені сценарії моделювання підтвердили коректність роботи модуля за різних умов, таких як:

- Динамічна зміна параметрів завад.
- Моделювання декількох джерел завад.

– Вплив просторового розташування джерел завад.

Таким чином, запропонований модуль є ефективним інструментом для моделювання завад, аналізу їх впливу на продуктивність мережі, а також для тестування нових алгоритмів оптимізації радіоресурсів.

Список літератури:

1. Introduction to OMNeT++ [Електронний ресурс] OMNeT++ : офіційний сайт. Режим доступу: <https://omnetpp.org/intro/>
2. About ns-3 [Електронний ресурс]. ns-3 : офіційний сайт. Режим доступу: <https://www.nsnam.org/about/>
3. Spectrum Model in ns-3 [Електронний ресурс] ns-3 : документація. Режим доступу: <https://surl.li/cnhqqs>
4. Wi-Fi Overview: 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements [Електронний ресурс]. Tektronix: офіційний ресурс. Режим доступу: <https://surl.li/ckqcss>
5. Метод ефективного динамічного розподілення каналів між голосовими викликами та даними [Електронний ресурс]. КРІ : журнал. Режим доступу: <https://elc.kpi.ua/old/article/view/35539>
6. Вузловий підхід щодо каналів розподілу [Електронний ресурс]. КРІ : журнал. Режим доступу: <https://surl.li/adfanq>
7. Особливості формування каналів розподілу [Електронний ресурс]. Львівська політехніка : журнал. Режим доступу: <https://surl.li/wohuqv>
8. INET Framework Introduction [Електронний ресурс]. OMNeT++ : офіційний сайт. Режим доступу: <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>
9. SimuLTE for OMNeT++ [Електронний ресурс]. SimuLTE : офіційний сайт. Режим доступу: <https://simulte.omnetpp.org/>

Yesych D.V., Lebedev D.Yu. IMPLEMENTATION OF A SOFTWARE MODULE FOR MODELING INTERFERENCE IN WIRELESS NETWORKS BASED ON 802.11 STANDARDS WITHIN THE NS-3 SIMULATOR

The article is devoted to the development and implementation of a software module for modeling interference in wireless networks based on 802.11 standards within the NS-3 simulator. The article reveals the main principles of interference modeling, including the analysis of physical and software aspects of signal interaction in wireless networks. Key shortcomings of existing tools, such as NS-3 and OMNeT++, have been identified, including the complexity of configuration, the lack of dynamic management of interference parameters, and insufficient support for randomization of interference parameters. A new approach is proposed to address these limitations by using a specialized script that structures the process of interference modeling.

The article provides a detailed description of the functional capabilities of the developed script, which allows encapsulating interference parameters into separate classes. This approach simplifies the configuration of interference parameters, including spectral power density, spectrum width, the number of interference sources, and their dynamic adjustment in real-time. Examples of test scenarios are presented, demonstrating the module's correct operation under various conditions, such as dynamic parameter changes, the impact of spatial positioning of interference sources, and their intensity.

The article establishes that the developed software module enables researchers to thoroughly analyze the impact of interference on network performance. This includes evaluating data transmission channel parameters, such as throughput, delays, and signal loss levels. The developed module significantly simplifies the testing of methods for minimizing and avoiding interference, such as dynamic channel allocation, frequency planning algorithms, and transmission rate adaptation. Two main classes, MultipleInterferenceHelper and MultipleInterferenceNode, are proposed in the article, which significantly simplify the management of interference sources and their integration into simulation scenarios. It is determined that using these classes allows for the automation of interference configuration and provides greater flexibility in the setup of simulation scenarios.

The proposed module is a powerful tool for developing new algorithms for radio resource optimization. Its use enables more realistic testing of wireless systems in overloaded frequency bands, which is particularly relevant for networks based on the 802.11 standard.

Key words: wireless networks, data transmission channel quality, interference, interference modeling, attenuation effect, 802.11 standard, transmission rate adaptation, NS-3.

Міхненко Я.О.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ В ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНИХ МЕРЕЖАХ

Парадигма програмно-визначених мереж (SDN) виникла у відповідь на обмеження традиційних мережеских архітектур, які не могли задовольнити зростаючі вимоги до швидкості, гнучкості та ефективності, необхідні в умовах сучасного цифрового середовища. Основними перевагами SDN є централізований глобальний мережеский огляд, що дозволяє адміністраторам отримувати та аналізувати інформацію про мережу в реальному часі, а також програмованість, яка забезпечує можливість налаштування мережі відповідно до специфічних потреб користувачів і застосунків у сучасному житті.

Інтернет став основою цифрового суспільства, функціонуючи як розподілена мережа з комутацією пакетів, що підключена практично до кожного цифрового пристрою, доступного в будь-якій точці світу. Це відкриває нові горизонти для взаємодії, комунікації й обміну інформацією, але також створює виклики, пов'язані з безпекою та управлінням. Традиційна мережа має кілька проблем, зокрема залежність від постачальників, жорстку політику маршрутизації, обмежену адаптивність до змінюваних умов, а також труднощі в масштабуванні, що можуть негативно вплинути на її загальну продуктивність і ефективність.

У статті досліджується систематичний огляд якості обслуговування (QoS) на основі проблем контролера, що є критично важливим аспектом для функціонування SDN. Аналізується поточний стан досліджень у цій галузі, узагальнюються результати роботи різних контролерів, які оцінюються за параметрами QoS, такими як надійність, масштабованість, узгодженість і балансування навантаження. Ці параметри є ключовими для забезпечення ефективної роботи мережі, яка повинна відповідати вимогам сучасних користувачів і бізнесу. Також визначено потенційні проблеми, які в подальшому необхідно вирішити для забезпечення кращих і більш повних можливостей QoS у мережах SDN/OpenFlow. Це включає в себе необхідність розробки нових алгоритмів, удосконалення існуючих технологій та інтеграцію з іншими мережескими рішеннями для досягнення максимальної ефективності та безпеки.

Ключові слова: програмно-визначена мережа, якість обслуговування, продуктивність мережі, пропускна здатність, затримка, джитер, архітектура SDN, ефективні механізми QoS.

Постановка проблеми. Програмно-визначені мережі – це новий підхід до управління мережами, який кардинально змінює спосіб проектування, управління та експлуатації мереж. У традиційних мережах рівень контролю та рівень дати тісно інтегровані всередині мережеских пристроїв, таких як маршрутизатори та комутатори. Однак, SDN роз'єднує ці компоненти, дозволяючи мережеским адміністраторам програмно керувати мережею з централізованого програмного контролера. Такий централізований контроль дозволяє динамічну конфігурацію та управління мережескими ресурсами, роблячи мережу більш гнучкою, чутливою та адаптованою до мінливих вимог. З погляду на це SDN є значущим у сучасному управлінні мережами з кількох причин, по-перше, він підвищує гнучкість, дозволяючи швидко та автоматизовану конфігурацію мережеских пристроїв, скорочуючи час, необхідний для

впровадження та обслуговування; по-друге, він покращує масштабованість і ефективність, дозволяючи мережеским адміністраторам динамічно масштабувати ресурси відповідно до реальних потреб. Отже, SDN сприяє інноваціям, надаючи платформу для розробки та впровадження нових мережеских послуг і додатків.

Однак в даному класі мереж виникають проблеми щодо якості обслуговування (QoS). Мережі постійно змінюються, умови також можуть швидко змінюватися, впливаючи на критичні фактори якості обслуговування, такі як доступна пропускна здатність та затримка. Наприклад, забезпечення стабільного та надійного QoS при змінних мережеских навантаженнях і різноманітних моделях трафіку є серйозною проблемою для мережеских адміністраторів. У середовищі SDN проблематика полягає в безперешкодному розширенні для розміщення зростаючої кількості підключе-

них пристроїв і додатків. Масштабування мережі з одночасним збереженням стабільного рівня QoS вимагає ефективного управління ресурсами та трафіком для задоволення потреб більшої мережі.

SDN передбачає поєднання різноманітних пристроїв і технологій, які повинні безперервно працювати разом. Досягнення послідовного досвіду QoS на різних елементах мережі вимагає встановлення стандартизованих протоколів і інтерфейсів для забезпечення плавної взаємодії. А встановлення та забезпечення єдиної політики QoS на всій мережевій інфраструктурі є складним завданням, яке передбачає узгодження налаштувань QoS з різними вимогами різних додатків та задоволення очікувань різних користувачів, що вимагає ретельного управління політикою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Програмно-визначена мережа постає як багатообіцяюча зміна парадигми, яка відокремлює площину управління від площини даних. Вона може [1] централізовано моніторити та контролювати мережу за допомогою програмного забезпечення, тобто контролера. Розгортання одного контролера є неефективним для обробки великого мережевого трафіку, таким чином, створення кількох контролерів є необхідним для поточної програмно-визначеної мережі в глобальних мережах.

Парадигма програмно визначеної мережі виникла у відповідь на обмеження традиційної мережевої архітектури. Основними перевагами є [2] централізований перегляд глобальної мережі, можливість програмування та розділення площини даних і площини керування. Ці функції привернули увагу дослідників для покращення надання QoS різноманітних сучасних мережевих програм. У статті [3] досліджуються можливості технології програмно-визначеної мережі для надання гарантій якості обслуговування.

У статті [4] запропоновано алгоритм планування на основі архітектури програмно визначеної мережі. Представлено архітектуру SDN та запропоновано удосконалений адаптивний багатопляховий алгоритм балансування навантаження на основі SDN.

Проведений аналіз робіт показав, що існуючі дослідження та розробки в галузі програмно-визначених мереж недостатньо враховують такі важливі аспекти, як надійність та масштабованість при забезпеченні якості обслуговування.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз методів підвищення параметрів якості обслуговування для забезпечення оптимальної продуктивності мережі.

Виклад основного матеріалу. В традиційних мережах, пристрої, такі як маршрутизатори та комутатори, виконують роль управління трафіком, забезпечуючи необхідний напрямок передачі даних між різними сегментами мережі, а також здійснюють контроль за маршрутизацією, фільтрацією і передачею інформації між пристроями та користувачами. Основним принципом SDN є розділення ролей: централізована платформа керування (контролер) приймає рішення, а пристрої (комутатори, маршрутизатори) просто роблять виконання цих рішень, передаючи та обробляючи трафік згідно з вказівками, отриманими від контролера, що дозволяє гнучко налаштовувати і оптимізувати мережу в реальному часі.

Основні терміни та визначення. Якість обслуговування полягає в тому, щоб переконатися, що процеси в мережі, які повинні відбуватися швидко і надійно.

Пропускна здатність це показник кількості одиниць інформації, яку система може обробляти за певний проміжок часу. Цей термін широко застосовується до різного роду систем, починаючи від різних аспектів комп'ютерних та мережевих систем до організацій. Споріднені заходи щодо продуктивності системи включають швидкість, з якою може бути завершено певне робоче навантаження, та час відгуку, кількість часу між одним інтерактивним запитом користувача та отримання відповіді. Затримка – це час, необхідний для передачі даних з однієї точки в іншу. Низька затримка означає, що дані надходять швидко.

Джиттер – небажані фазові та/або частотні випадкові спотворення під час передачі сигналу. Виникають внаслідок нестабільності тактового генератора, змін параметрів лінії передачі в часі та різної швидкості поширення частотних складових одного і того ж сигналу. У цифрових системах проявляється у вигляді випадкових швидких змін цифрового сигналу в часі, що призводить до розсинхронізації та, як наслідок, спотворення переданої інформації.

Надійність – це характеристика, що визначає можливість абонентів обмінюватися інформацією по мережах зв'язку в умовах виникнення технічних відмов і експлуатаційних помилок на її елементах без помітного погіршення імовірісно-часових показників обслуговування заявок.

Далі розглянемо архітектуру SDN та існуючі ефективні механізми QoS (рис. 1). У традиційній мережі самі пристрої вирішують, як обробляти трафік. Це може призвести до перевантаження, оскільки кожен пристрій приймає власні рішення.

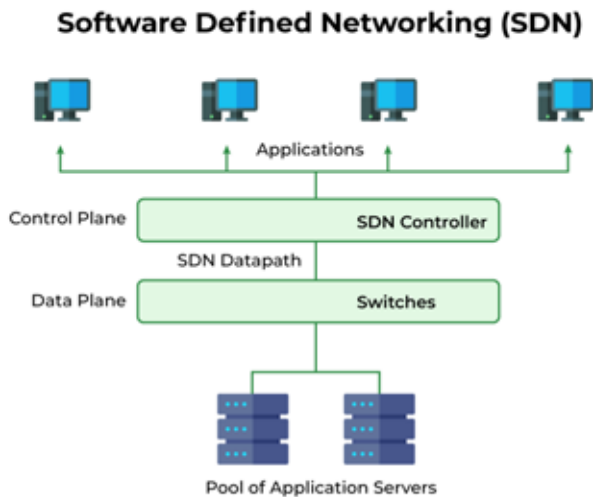


Рис. 1. Архітектура SDN

В SDN центральний контролер [6] має карту і планує найкращі маршрути для кожного типу трафіку. Це планування включає найшвидші та надійні маршрути.

Парадигма програмно-визначених мереж [9] виникла у відповідь на обмеження традиційних мережових архітектур. Систематичний огляд QoS на основі проблем контролера, аналізує поточний стан досліджень і узагальнюються результати роботи різних контролерів на основі параметрів QoS, таких як надійність, масштабованість, узгодженість і балансування навантаження.

Розглянемо потенційні проблеми які виникають у мережах SDN/OpenFlow:

1. Рівень передачі даних (Data Plane): рівень передачі даних у мережі SDN виконує інструкції, отримані від контролера SDN. Він відповідає за виконання правил маршрутизації [5], визначених контролером, і забезпечує направлення пакетів відповідно до заданих програм.

2. Контролер SDN (SDN Controller): Контролер SDN є централізованою платформою керування архітектури SDN, що забезпечує централізовану точку для керування та управління мережею. Він спілкується з рівнем передачі даних SDN, щоб приймати рішення щодо маршрутизації пакетів.

3. Рівень управління операціями (Operation Plane): включає різноманітні мережові служби та операції, які керують поведінкою мережі, такі як балансування навантаження, брандмауери тощо. Рівень управління операціями конфігурує та моніторить рівень передачі даних мережі.

4. Рівень управління (Control Plane): діє як контролер і є програмно-керованою мережевою системою. Рівень управління приймає всі

рішення щодо маршрутизації [5] на основі топології мережі, а також керує різними контролерами та іншими компонентами.

Для відеодзвінків або потокової передачі більша пропускна здатність забезпечує більш плавну роботу. У завантаженій мережі правильне керування гарантує, що кожен отримає справедливую частку «магістралі», запобігаючи затримкам. Управління смугою пропускання в SDN схоже на централізоване регулювання потоків у транспортній системі за допомогою інтелектуальної системи управління. Це означає, що SDN дозволяє контролювати потоки даних через мережу, керуючи розподілом смуги пропускання на основі політик, пріоритетів і реального стану мережі. В мережах SDN зменшення втрати пакетів у досягається за рахунок централізованого управління мережею, динамічного перенаправлення трафіку та застосування політик якості обслуговування. Оскільки в SDN контроль і управління мережею відділені від передачі даних, це забезпечує більшу гнучкість для запобігання та мінімізації втрат пакетів. А надійністю описується здатність інфокомунікаційної системи функціонувати без збоїв протягом певного часу. Вона залежить від апаратного та програмного забезпечення, а також від стійкості до помилок.

Проведемо аналіз методів поліпшення QoS в SDN які охоплюють широкий спектр підходів і технологій та забезпечують ефективну передачу даних, зменшення затримок, мінімізацію втрат пакетів і підтримку необхідної пропускної здатності для критично важливих застосувань. SDN, завдяки централізованому управлінню мережею, надає розширені можливості для оптимізації QoS.

Віртуальні сегменти мережі для індивідуального QoS є методологією, що дозволяє поділити фізичну мережу на кілька віртуальних сегментів, кожен із яких налаштовується під конкретні вимоги до якості обслуговування. У контексті SDN цей процес реалізується завдяки централізованому управлінню мережею, що забезпечує гнучкість і ефективність налаштування (табл. 1).

Підходи на основі машинного навчання (ML) у SDN стають все більш популярними завдяки можливостям аналізу складних мережових умов, автоматизації управління та оптимізації роботи мережі. Використання ML [7] у SDN допомагає вирішувати завдання, пов'язані з передбаченням трафіку, виявленням аномалій, покращенням QoS та управлінням ресурсами (табл. 2).

Досягається це основними напрямками машинного навчання як передбачення трафіку,

Таблиця 1

Приклади віртуальних сегментів і QoS-параметрів

Тип віртуальних сегментів	Призначення	QoS-параметри
eMBB (Enhanced Mobile Broadband) – розширений мобільний широкосмуговий доступ	Стрімінгові сервіси, AR/VR	Висока пропускна здатність, помірна затримка
URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) – наднадійний зв'язок із низькою затримкою	Телемедицина, автономні авто	Низька затримка, висока надійність
mMTC (Massive Machine-Type Communications) – масивні комунікації машинного типу	ІоТ, розумні міста	Масштабованість, оптимізація енергоспоживання
Користувачський віртуальний сегмент	Специфічний сервіс (наприклад, корпоративний VPN)	Пропускна здатність та безпека

Таблиця 2

Підходи ML, які використовуються у SDN

Категорія ML	Приклади задач у SDN	Методи
Класифікація	Виявлення DDoS-атак, класифікація трафіку	Support Vector Machines, Decision Trees
Регресія	Прогнозування пропускної здатності	Лінійна регресія, LSTM
Кластеризація	Групування схожих потоків трафіку	K-Means, DBSCAN
Аномалійний аналіз	Виявлення аномалій у трафіку	Autoencoders, Isolation Forest
Reinforcement Learning (RL)	Оптимізація маршрутизації, балансування навантаження	Q-Learning, Deep Q-Networks
Deep Learning (DL)	Складний аналіз QoS, передбачення мережевого стану	CNN, RNN, LSTM

виявлення аномалій та безпека, оптимізація QoS, балансування навантаження, енергозбереження та інші.

Динамічні механізми регулювання QoS забезпечують адаптивне управління мережею для підтримки стабільної якості обслуговування, навіть у разі змін у трафіку, навантаженні або мережевих умовах. У контексті сучасних мереж, особливо SDN, ці механізми дозволяють гнучко реагувати на зміни в реальному часі та підвищувати ефективність роботи мережі.

До таких механізмів відносять системи та алгоритми, які: аналізують поточні умови мережі; динамічно змінюють параметри QoS (пропускну здатність, пріоритети трафіку, затримку, джиттер) для різних потоків трафіку; адаптують мережеву поведінку до змін у реальному часі.

Проблеми впровадження QoS в SDN. Хоча SDN пропонує значні переваги, реалізація QoS в середовищах SDN має наступні проблеми:

1. Навантаження на контролер: масштабованість: зі зростанням мереж контролер може стати єдиною точкою відмови та вузьким місцем; складність – управління великою кількістю потоків і політик може бути складним і ресурсомним.

2. Управління таблицями потоків: записи в таблиці потоків – ефективне управління записами в таблиці потоків є критичним для оптимальної продуктивності; динамічні шаблони трафіку – адаптація до динамічних шаблонів трафіку та оновлення таблиць потоків в реальному часі може бути складним завданням.

3. Проблеми безпеки: централізована точка керування – централізований контролер може стати мішенню для атак, що може призвести до компрометації всієї мережі; безпечне спілкування – забезпечення безпечного зв'язку між контролером і мережевими пристроями є важливим.

4. Проблеми взаємодії: впровадження специфік для постачальників – різні постачальники можуть мати різні реалізації SDN, що призводить до проблем взаємодії; стандартизація – необхідність стандартизованих протоколів і API для забезпечення безперебійної інтеграції різних компонентів SDN.

5. Виконання політик QoS: моніторинг і контроль в реальному часі – забезпечення виконання політик QoS в реальному часі, особливо під час пікових навантажень або мережевих збоїв; динамічне налаштування – адаптація політик QoS до змін умов мережі та вимог додатків.

6. Відмова контролера та відновлення: толерантність до помилок – реалізація механізмів для обробки відмов контролера та забезпечення стійкості мережі; швидке відновлення – мінімізація простою та відновлення функціональності мережі після відмови контролера.

7. Складність мережі: великомасштабні мережі – управління QoS у великомасштабних мережах зі складною топологією може бути складним; різноманітні потоки трафіку – обробка різних типів трафіку (наприклад, голос, відео, дані) з різними вимогами до QoS.

Для вирішення вище викладених проблем потрібне ретельне планування, надійна реалізація та постійний моніторинг і оптимізація. Ефективне управління цими проблемами дозволить SDN забезпечити значні переваги з точки зору продуктивності мережі, гнучкості та масштабованості.

Розглянемо основні тенденції та напрямки досліджень.

Машинне навчання та штучний інтелект. Ці методи дозволяють аналізувати мережеві умови, прогнозувати шаблони трафіку та динамічно оптимізувати мережеві ресурси. Враховуючи такі фактори, як використання мережі, затримка та умови навколишнього середовища, алгоритми машинного навчання можуть приймати інтелектуальні рішення для покращення QoS в реальному часі. Дослідники все частіше досліджують інтеграцію методів машинного навчання для підвищення QoS в SDN. Це передбачає використання алгоритмів штучного інтелекту для аналізу мережі в реальному часі, виявлення аномалій та прийняття інтелектуальних рішень для динамічної оптимізації параметрів QoS.

Інтелектуальна мережа на основі намірів (Intent-Based Networking, IBN). Мережі на основі намірів спрямовані на спрощення управління мережею шляхом дозволу адміністраторам вказувати високорівневі наміри, а мережа автономно перекладає їх у виконувани конфігурації. Цепідвищує ефективність і зручність користувача при управлінні QoS в SDN.

Блокчейн для безпеки та довіри. Технологія блокчейн [8, 10, 11] досліджується на предмет її потенціалу забезпечення безпеки та довіри в середовищах SDN. Децентралізований та стійкий до підробок характер блокчейну може вирішити проблеми безпеки, пов'язані з реалізацією QoS.

Інтеграція периферійних обчислень. Зі зростанням обчислень периферійної мережі зростає потреба в інтеграції SDN та edge computing для оптимізації QoS для додатків, які вимагають низької затримки та високої пропускну здатності.

Міждоменне управління QoS. Проблеми взаємодії зберігаються в багатодоменних середовищах SDN. Дослідження можуть усунути ці прогалини, розробивши стандартизовані підходи до міждоменного керування QoS, що забезпечить безперебійну координацію між різними доменами мережі.

Отже, більшість моделей QoS наразі орієнтовані на мережу. Подальші дослідження можуть вивчити розробку орієнтованих на користувача моделей QoS, які враховують суб'єктивний досвід кінцевих користувачів, гарантуючи, що покращення QoS узгоджуються з очікуваннями користувачів.

Висновки. SDN змінює мережеву архітектуру, пропонуючи централізований контроль та програмованість і цей концептуальний зсув відкриває нові можливості для поліпшення показників QoS. Динамічні можливості інженерії трафіку SDN виділяються як ключовий фактор оптимізації продуктивності мережі, а здатність адаптувати та керувати потоками трафіку в реальному часі значно сприяє мінімізації затримки, джиттера та втрати пакетів. Визначним аспектом покращення QoS є інтеграція SDN із середовищами хмарних обчислень яка сприяє ефективному розподілу ресурсів на основі вимог додатків, підвищуючи загальну якість обслуговування в мережі. А інтеграція SDN із середовищами хмарних обчислень створює можливості для підвищення якості обслуговування шляхом ефективного розподілу ресурсів на основі вимог додатків.

Список літератури:

1. Singh A.K., Srivastava S. A survey and classification of controller placement problem in SDN. *International Journal of Network Management*. 2018. № 28, P. 1–25. DOI: 10.1002/nem.2018.
2. Karakus M., Durresi A. Quality of Service (QoS) in Software Defined Networking (SDN): A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. № 80. P. 200–218. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.12.019.
3. Aiman A.N, Tarik T, JaeSeung S. A software-defined queuing framework for QoS provisioning in 5G and beyond mobile systems. *IEEE Network*. 2021. № 35(2). P. 168–173. DOI: 10.1109/MNET.011.2000441.
4. Lu L. Multi-path allocation scheduling optimization algorithm for network data traffic based on SDN architecture. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*. 2020. Vol. 37, Issue 4. P. 1237–1247, DOI: 10.1093/imamci/dnaa011.

5. Casas-Velasco D.M., Rendon O.M.C., da Fonseca N.L.S. Intelligent routing based on reinforcement learning for software-defined networking. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021. Vol. 18, № 1. DOI: 10.1109/TNSM.2020.3036911.
6. Oktian YE, Lee S, Lee H, Lam J. Distributed SDN controller system: A survey on design choice. *Comput Networks*. 2017. № 121, P. 100–111. DOI: 10.1016/j.comnet.2017.04.038.
7. Mahdi Fallah and Parya Mohammadi. Optimizing QoS Metrics for Software-Defined Networking in Federated Learning. *Mobile Information Systems*. 2023. DOI: 10.1155/2023/3896267.
8. Murat K, Evrim G, Furkan A, Suleyman U. QoS-CAPE: QoS-Centric Adaptive Path Engineering with Blockchain-Enabled Reinforcement Learning. *Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*. 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/ASYU62119.2024.10757123.
9. Huang X, Cheng S, Cao K. A survey of deployment solutions and optimization strategies for hybrid SDN networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2019. Vol. 21, №. 2. P. 1483–1507. DOI: 10.1109/COMST.2018.2871061.
10. Karakus M, Guler E. RoutingChain: A Proof-of-Concept Model for a Blockchain-Enabled QoS-Based Inter-AS Routing in SDN *IEEE BlackSeaCom*. 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9235021.
11. Guler E, Karakus M, Uludag S. Spectrum chain: An efficient spectrum management framework in blockchain-enabled flexible SDONs. *ICC 2022 IEEE International Conference on Communications*. 2022. P. 5744–5749. DOI: 10.1109/ICC45855.2022.9838747.

Mikhnenko Ya.O. QUALITY OF SERVICE ANALYSIS IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS

The paradigm of Software-Defined Networking (SDN) emerged in response to the limitations of traditional network architectures, which were unable to meet the growing demands for speed, flexibility, and efficiency required in today's digital environment. The primary advantages of SDN include centralized global network visibility, which allows administrators to access and analyse network information in real-time, and programmability, which enables customization of the network to suit the specific needs of users and applications in modern life.

The Internet has become the foundation of the digital society, functioning as a distributed packet-switched network connected to virtually every digital device available anywhere in the world. This opens new horizons for interaction, communication, and information exchange but also presents challenges related to security and management. Traditional networks face several issues, including vendor dependency, rigid routing policies, limited adaptability to changing conditions, and difficulties in scaling, which can negatively impact their overall performance and efficiency.

The article explores a systematic review of Quality of Service (QoS) based on controller-related challenges, which are critical aspects for the operation of SDN. It analyses the current state of research in this field and summarizes the performance of various controllers evaluated through QoS parameters such as reliability, scalability, consistency, and load balancing. These parameters are key to ensuring effective network operation that meets the demands of modern users and businesses. The article also identifies potential issues that need to be addressed in the future to provide better and more comprehensive QoS capabilities in SDN/OpenFlow networks. This includes the need for developing new algorithms, improving existing technologies, and integrating with other networking solutions to achieve maximum efficiency and security.

Key words: Software-Defined Networking, Quality of Service, network performance, bandwidth, latency, jitter, SDN architecture, efficient QoS mechanisms.

УДК 004:378

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/12>**Сусли А.І.**

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Біганич В.Ю.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Шуста В.С.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Євич М.Я.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Шуста В.Ю.

Закарпатська філія ДП Івано-Франківськстандартметрологія

ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ В СФЕРІ ОСВІТИ: ВІД ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ДО ОНЛАЙН РЕСУРСІВ

Стаття присвячена дослідженню ролі електронних комунікацій у трансформації освітнього процесу в умовах цифровізації та глобалізації. Розглянуто ключові технології, такі як системи управління навчанням (LMS), хмарні сервіси, відеоконференц-зв'язок та інструменти штучного інтелекту, що забезпечують нові можливості для дистанційного навчання та онлайн-ресурсів. Проаналізовано сучасні тенденції фінансування онлайн-освіти, її розвиток до 2027 року та значення для забезпечення доступності знань. Особлива увага приділена розвитку спеціалізованих платформ та стартапів, які зосереджені на адаптивних моделях навчання та професійній сертифікації. У статті акцентується увага на впливі глобалізації на розвиток електронних комунікацій у сфері освіти, що забезпечують адаптацію навчальних процесів до сучасних викликів. Детально проаналізовано впровадження інноваційних технологій, таких як штучний інтелект (AI) та віртуальна реальність (VR/AR), які формують інтерактивні та персоналізовані середовища для навчання. Розглянуто приклади провідних платформ, які стали рушіями змін: Coursera, Khan Academy та Duolingo, а також їхнє значення для розвитку професійних компетенцій у цифрову епоху. Зроблено висновок, що електронні комунікації є засобом навчання та інструментом для підвищення ефективності управління освітнім процесом та розширення доступу до знань у глобальному масштабі. Визначено перспективи подальших досліджень у сфері електронних комунікацій, що спрямовані на інтеграцію технологій у традиційні освітні структури та розвиток інклюзивного доступу до навчання для всіх верств населення. У статті також розкрито значення потужної цифрової інфраструктури для ефективного впровадження інновацій у сфері освіти. Висвітлено першопричини появи електронних комунікацій, їх еволюцію та перспективи подальшого розвитку технологій у 2027–2028 роках. Виокремлено ключові виклики та можливості, які забезпечують електронні комунікації у сучасній освітній екосистемі. Окреслено потенціал новітніх технологій для підвищення інклюзивності освіти та глобальної інтеграції знань.

Ключові слова: електронні комунікації; дистанційне навчання; онлайн-ресурси; штучний інтелект; освітні платформи; глобалізація освіти.

Постановка проблеми. Дослідження спрямоване на аналіз ключових технологій електронних комунікацій, їхнього впливу на трансформацію освітніх процесів та визначення перспектив подальшого розвитку до 2027–2028 років. Особливий акцент зроблено на важливості створення інтерактивних освітніх платформ, які забезпечують доступ до знань та глибоку інтеграцію з потребами ринку праці. У статті також

розглянуто роль стартапів у розвитку вузькоспеціалізованих платформ та інклюзивності освіти, що дозволяє розширити можливості навчання для різних соціальних груп. Дослідження є актуальним для формування стратегій подальшого розвитку онлайн-освіти, яка повинна адаптуватися до викликів сучасного суспільства, забезпечуючи сталий розвиток та глобальну інтеграцію знань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі електронні комунікації у сфері освіти розглядаються як ключовий інструмент модернізації навчального процесу, що значно підвищує доступність знань у цифрову епоху. У дослідженнях Акмесе та ін. [1], Керра і співавторів [2], а також Купера та колег [3] аналізується вплив інтерактивних навчальних платформ і маркетингових комунікацій на якість освіти в умовах глобалізації. У роботі Оу та ін. [4] розглянуто використання мовних інструментів на основі штучного інтелекту для вдосконалення академічної комунікації, що підкреслює важливість персоналізації та ефективності освітніх ресурсів. Такі аспекти, як застосування віртуальної реальності для розвитку комунікативних навичок у медичній освіті (Ходабахшиан та ін. [5]) або бар'єри комунікації у медсестер під час навчання дітей з інтелектуальними порушеннями (Курт та ін. [6]), демонструють широку сферу застосування електронних інструментів у різних галузях освіти. Систематичні огляди дослідження Сяоян та ін. [7], наголошують на необхідності розвитку міжкультурної комунікаційної компетенції у міжнародних студентів, тоді як Хао [8] вивчає можливості інтелектуальних платформ для інтернаціоналізації естетичної освіти. Останні дослідження також підкреслюють важливість ефективної електронної поштової комунікації між студентами та професорами у вищій освіті (Тратник та ін. [9]), що є основою для побудови гнучких навчальних середовищ. Наявні дослідження свідчать про інтенсивний розвиток технологій та їхній позитивний вплив на освітні процеси, водночас залишаючи відкритими питання їх подальшої адаптації до швидко змінюваних умов глобалізації.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження ролі електронних комунікацій у трансформації освітнього процесу та визначення ключових шляхів вдосконалення онлайн-освіти у глобальному контексті. Основними завданнями дослідження стали аналіз сучасних технологій, таких як Learning Management Systems (LMS), хмарні сервіси, інструменти штучного інтелекту, VR/AR-технології, а також їхній вплив на доступність і якість освіти. Надано оцінку динаміці розвитку онлайн-освіти, професійних сертифікаційних програм та дистанційного навчання, базуючись на прогнозах до 2027–2028 років.

Стаття також спрямована на визначення ролі стартапів та інноваційних платформ у створенні нових моделей навчання, які інтегрують сучасні

технології для персоналізації освітнього процесу. Виокремлено ключові виклики, пов'язані з адаптацією онлайн-освіти до потреб ринку праці, та запропоновано напрямки подальших досліджень у сфері інклюзивного навчання, цифрової інфраструктури та глобального обміну знаннями.

Виклад основного матеріалу. Електронні комунікації в сфері освіти стають одним із ключових факторів трансформації сучасного навчального процесу в умовах глобалізації. У період 2023–2024 років, стрімкий розвиток технологій, таких як штучний інтелект (AI), зробив значний внесок у вдосконалення освітніх платформ та інструментів. Такі країни, як США, Китай і Південна Корея, активно впроваджують AI у навчальні середовища, створюючи адаптивні платформи, які здатні персоналізувати навчальний процес. В Китаї AI використовується для аналізу навчальних даних та розробки індивідуальних навчальних траєкторій. Водночас, у США такі компанії, як Coursera та Khan Academy, інтегрують інструменти на основі AI для створення інтерактивних курсів і автоматизації оцінювання. Зростання впливу AI на освітній процес є ключовим для розширення доступу до знань і покращення якості навчання, особливо у віддалених регіонах світу.

Електронні комунікації відіграють центральну роль у створенні інклюзивного освітнього середовища, забезпечуючи рівний доступ до знань для різних соціальних груп, включаючи людей із обмеженими можливостями, тих, хто проживає у віддалених регіонах, та малозабезпечених осіб. Завдяки таким технологіям, як автоматичне перекладення текстів, синхронізація субтитрів у відеоматеріалах і адаптивний дизайн навчальних платформ, зникають бар'єри, що традиційно обмежували участь цих груп у навчальному процесі. Штучний інтелект використовується для створення персоналізованих траєкторій навчання для студентів з порушеннями слуху або зору, інтегруючи аудіоописи, текстові трансляції та спеціалізовані шрифти для людей із дислексією. У віддалених регіонах, де інфраструктура обмежена, мобільні платформи, як-от Google Classroom, дозволяють користувачам отримувати освіту навіть за відсутності стабільного доступу до комп'ютерів чи високошвидкісного інтернету. Згідно з дослідженнями Statista, понад 60% студентів у країнах із низьким рівнем цифровізації відзначають зростання доступності якісних освітніх ресурсів завдяки мобільним додаткам і хмарним технологіям. Електронні комунікації розши-

рюють доступ до знань та сприяють соціальній інтеграції через освітній процес.

Зростання фінансування онлайн-освіти свідчить про значний потенціал галузі, яка демонструє стійке зростання протягом останніх років. Згідно з даними, обсяги інвестицій у платформу онлайн-освіти зросли з 21,06 мільярда доларів у 2017 році до 65,17 мільярда у 2027 році. Освітні університетські онлайн-програми показують ще більш вражаючу динаміку, збільшуючись із 41,44 мільярда доларів у 2017 році до прогнозованих 166,2 мільярда у 2027 році. Крім того, ринок професійних сертифікатів значно зріс, підвищуючись із 3,11 мільярда доларів у 2017 році до 7,89 мільярда у 2027 році. Дані відображають постійне зростання попиту на сертифікаційні програми та розвиток технологій, які сприяють глобальному впровадженню дистанційного навчання та онлайн-ресурсів.

Розвиток стартапів у сфері дистанційного навчання є рушієм інновацій і створення спеціалізованих платформ, що змінюють традиційну освіту. Проекти на кшталт Udemy та Skillshare, які спочатку були орієнтовані на доступ до коротких курсів, перетворилися на масштабні екосистеми для професійного розвитку. Ініціативи як Duolingo, змогли використати принципи гейміфікації, щоб зробити навчання більш доступним і привабливим. Водночас стартапи на кшталт OutSchool пропонують вузькоспеціалізовані курси, орієнтовані на конкретні вікові групи або галузі знань. Інноваційність цих платформ полягає в їхній здатності швидко адаптуватися до потреб ринку, забезпечуючи навчання та професійну сертифікацію. У довгостроковій перспективі такі проекти формують нову освітню екосистему, яка є більш інклюзивною, персоналізованою та технологічно прогресивною.

Онлайн-ресурси набули широкого поширення серед провідних країн і університетів світу, демонструючи ключову роль у трансформації освітнього процесу. Гарвардський університет і Массачусетський технологічний інститут (MIT) активно розвивають платформи онлайн-освіти через ініціативу EdX, яка надає доступ до сотень курсів для студентів з усього світу. Водночас, Китай інвестує значні кошти у платформи, як-от iCourse та XuetangX, які об'єднують мільйони користувачів. У Європі такі університети, як Оксфорд і Кембридж, також впроваджують цифрові ресурси для дистанційного навчання, забезпечуючи глобальний доступ до своїх програм. Ініціативи збагачують традиційну освіту та сприяють розвитку гібридних моделей навчання, що поєднують очне та дистанційне навчання.

Цифрова інфраструктура має вирішальне значення для ефективності електронних комунікацій у сфері освіти. Завдяки таким технологіям, як LMS, відеоконференц-зв'язок та інтерактивні дошки, студенти отримують можливість доступу до якісної освіти незалежно від географічного положення. LMS на основі SCORM дозволяють персоналізувати навчання, тоді як відеоплатформи, як-от Zoom та MS Teams, забезпечують комунікацію у реальному часі. Хмарні платформи, зокрема Google Drive, створюють безпечне середовище для обміну даними, тоді як VR/AR-технології дозволяють моделювати складні навчальні процеси. Інструменти сприяють підвищенню якості освіти та забезпечують доступ до знань для широкого кола користувачів, включаючи дорослих професіоналів, які прагнуть підвищити свою кваліфікацію.

Інтеграція технологій аналізу великих даних (Big Data) у сферу освіти стає основою для гли-

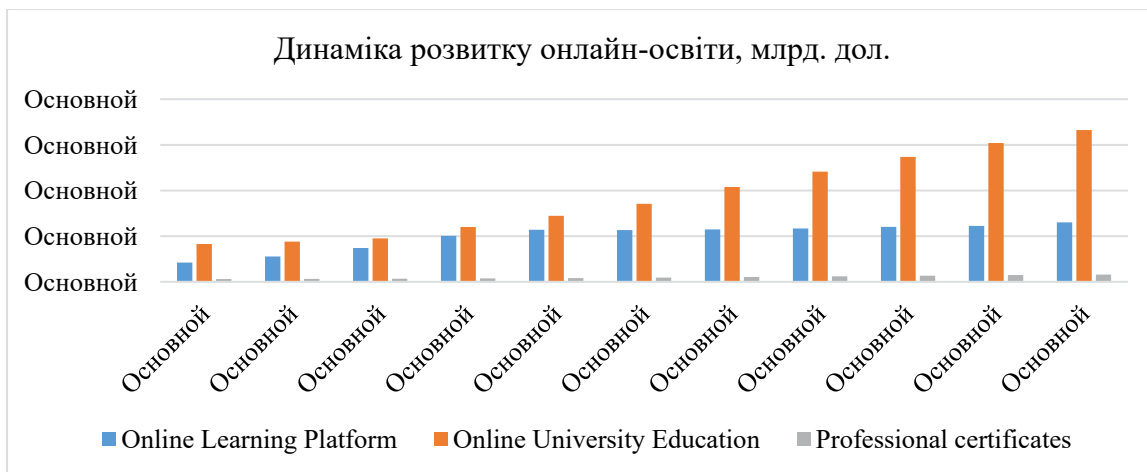


Рис. 1. Динаміка розвитку онлайн-освіти, млрд. дол., 2017–2027

бокого розуміння навчального процесу, що дозволяє вдосконалювати його на всіх рівнях. Застосування аналітичних алгоритмів у рамках платформ управління навчанням (LMS) дає змогу відстежувати прогрес студентів, ідентифікувати їхні сильні й слабкі сторони та забезпечувати своєчасне коригування освітніх програм. Системи Blackboard і Canvas, використовують Big Data для створення динамічних дашбордів, які допомагають викладачам відстежувати успішність окремих студентів і цілих груп. Дані по поведінку студентів під час виконання тестів або перегляду відеолекцій також дають можливість визначати, які формати навчальних матеріалів є найбільш ефективними. Університети активно використовують ці дані для розробки програм, що відповідають запитам ринку праці, сприяючи підвищенню їхньої конкурентоспроможності. Окрім того, аналіз великих даних дозволяє прогнозувати потреби у навчальних матеріалах і технологіях, що забезпечує стратегічне планування в освітніх закладах.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку електронних комунікацій у сфері освіти є інтеграція платформ для автоматизованого аналізу успішності студентів. Технології штучного інтелекту, вже застосовувані в таких системах, як Coursera та Khan Academy, дозволяють аналізу-

вати великі обсяги даних про навчальний процес, ідентифікувати слабкі місця у знаннях студентів та пропонувати персоналізовані рекомендації для їх усунення. Алгоритми аналізу прогресу, впроваджені в Canvas, дозволяють викладачам оцінювати ефективність навчальних матеріалів та своєчасно коригувати підхід до викладання. Крім того, розвиток технологій Natural Language Processing (NLP) дає можливість автоматизувати створення тестів і наукових завдань, що сприяє значній економії часу як для студентів, так і для викладачів. Напрямок у перспективі може повністю змінити методику навчання, зробивши її більш адаптивною та ефективною.

У 2023–2024 роках стрімкий розвиток штучного інтелекту забезпечив ще більшу інтерактивність та ефективність цих технологій. Прогнозується, що до 2027–2028 років онлайн-освіта стане ще більш персоналізованою завдяки впровадженню генеративного AI, який дозволить адаптувати навчальні матеріали до потреб кожного студента. Технології на базі автоматизованих систем можуть інтегруватися в навчальні платформи для миттєвого вирішення освітніх запитів. Це, в свою чергу, сприятиме подальшій демократизації знань та підвищенню доступності освіти для всіх.

Таблиця 1

Ключові технології електронних комунікацій у сфері освіти

Технологія	Технічні параметри	Характеристика
Learning Management Systems (LMS)	Інтеграція SCORM, підтримка HTML5, доступ до API, адаптивний дизайн, обробка великих даних	LMS (наприклад, Moodle, Canvas) дозволяють керувати курсами, навчальними матеріалами та прогресом студентів.
Відеоконференц-зв'язок (Zoom, MS Teams)	Відео HD, підтримка до 1000 учасників, сумісність із мобільними пристроями, шифрування даних	Інструменти для онлайн-лекцій, семінарів та групових занять із функціями запису й інтеграції з LMS.
Хмарні платформи для зберігання даних (Google Drive, OneDrive)	Зберігання до 1 ТБ/користувача, шифрування AES-256, інтеграція з різними платформами	Обмін навчальними матеріалами, документами та проектами у захищеному середовищі.
Інтерактивні дошки (Jamboard, Miro)	Підтримка малювання в реальному часі, інтеграція з Google Workspace, можливість колективного редагування	Інтерактивні дошки дозволяють створювати візуалізації та графіки для навчання або проектів.
Системи управління тестуванням (Kahoot, Quizizz)	Реалізація адаптивних тестів, таймер, автоматичне оцінювання, аналіз результатів	Інструменти для створення тестів і вікторин із автоматичною оцінкою результатів.
VR/AR-технології (Google Expeditions, Oculus)	Висока роздільна здатність VR, інтеграція зі смартфонами, 3D-моделювання	Використання віртуальної та доповненої реальності для симуляцій і досліджень об'єктів.
Електронні підручники та ресурси (Coursera, EdX)	Адаптація до мобільних пристроїв, підтримка інтерактивних елементів, збереження прогресу	Онлайн-курси забезпечують доступ до матеріалів та інтегруються із сертифікацією.
Чат-боти для навчання (ChatGPT, Watson Assistant)	Штучний інтелект, інтеграція з API, обробка природної мови (NLP), швидкість відповіді <1 сек	Чат-боти автоматизують відповіді на запити студентів і надають підтримку в навчанні.

Гейміфікація, як інноваційний підхід до освіти, активно трансформує навчальний процес, роблячи його більш інтерактивним і цікавим для студентів. Застосування ігрових елементів у навчанні сприяє кращому засвоєнню знань, оскільки підвищує мотивацію, залученість і емоційну складову взаємодії з матеріалами. Такі платформи, як Kahoot, Quizizz та Classcraft, створюють інтерактивні завдання, які дозволяють студентам змагатися між собою або співпрацювати для досягнення загальних цілей. У вищій освіті гейміфікація особливо ефективна у галузях STEM, де складні теоретичні поняття можуть бути представлені через симуляції та інтерактивні експерименти у віртуальних лабораторіях. Студенти-хіміки можуть моделювати хімічні реакції у віртуальному середовищі, що знижує ризик помилок і покращує розуміння матеріалу. Результати досліджень демонструють, що гейміфікація підвищує рівень засвоєння матеріалу на 30–40% і сприяє розвитку критичного мислення та навичок вирішення проблем. Відповідний підхід ефективно інтегрується з іншими інноваціями, такими як віртуальна реальність і штучний інтелект, створюючи умови для глибшого занурення в навчальний процес.

Значний вплив на подальший розвиток електронних комунікацій матиме підвищення рівня доступності освітніх ресурсів у країнах, що розвиваються. У багатьох африканських країнах вже впроваджуються ініціативи з розвитку мобільного навчання – програма UNESCO “Global Education Coalition”, яка забезпечує доступ до онлайн-освіти через смартфони. Це відкриває нові можливості для студентів, які раніше не мали доступу до якісних навчальних ресурсів. Прогнозується, що до 2028 року використання мобільних технологій для дистанційного навчання охопить понад 70% населення в країнах, що розвиваються, завдяки зниженню вартості підключення до інтернету та поширенню недорогих пристроїв. Даний тренд посилює глобальну освітню інклюзію та стимулює

подальші інновації у сфері електронних комунікацій, включаючи розробку нових платформ та інтерактивних інструментів.

Висновки. У сучасному світі електронні комунікації стали невід'ємною складовою освітнього процесу, забезпечуючи доступ до знань незалежно від географічного положення чи соціального статусу. Аналіз розвитку онлайн-освіти демонструє, що інтеграція таких технологій, як Learning Management Systems (LMS), відеоконференц-зв'язок, хмарні сервіси та інструменти штучного інтелекту, значно підвищує ефективність навчання та знижує бар'єри для отримання освіти. Дані про стійке зростання інвестицій в онлайн-освіту свідчать про її глобальне визнання як ключового напрямку освітньої трансформації. Провідні країни США, Китай та Великобританія, демонструють високу адаптивність до цих змін, активно впроваджуючи нові платформи та методи. У поєднанні з персоналізацією навчання та інтерактивними технологіями це дозволяє значно підвищити якість освіти та її відповідність сучасним вимогам ринку праці.

Подальший розвиток електронних комунікацій у сфері освіти пов'язаний із прогресом у технологіях штучного інтелекту, автоматизації та глобалізації освітніх ресурсів. Прогнозується, що до 2028 року онлайн-освіта набуде ще більшої інтерактивності, персоналізації та доступності завдяки впровадженню інноваційних технологій, таких як генеративний AI, VR/AR, та інструментів для глибокого аналізу даних. Водночас зростання попиту на сертифікаційні програми та спеціалізовані платформи свідчить про необхідність подальшої розробки вузькоорієнтованих курсів і проєктів, здатних забезпечити компетенції для цифрової економіки. Електронні комунікації стають інструментом для поширення знань та рушієм соціальних змін, сприяючи зростанню інклюзивності освіти та розширенню її глобального охоплення.

Список літератури:

1. Akmes Z. B., Demir E., Oran N. T. An online communication skills education program for midwifery students: A quasi-experimental study. *Nurse Education Today*. 2024. 134. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2023.106070>
2. Kerr G., Lings I., Terry L., Richards J., Muirhead B. Competitive advantage for life: an industry view of marketing communication education. *Journal of Marketing Communications*. 2024. 30(2). Pp. 265–281. <https://doi.org/10.1080/13527266.2023.2280055>
3. Cooper H. B., Ewing M. T., Jayasinghe L., Struweg I., Wait M. Marketing communication education in developing countries: Post-pandemic insights from India and South Africa. *Journal of Marketing Communications*. 2024. 30(2). Pp. 242–264. <https://doi.org/10.1080/13527266.2023.2208131>
4. Ou A. W., Stöhr C., Malmström H. Academic communication with AI-powered language tools in higher education: From a post-humanist perspective. *System*. 2024. 121. <https://doi.org/10.1016/j.system.2024.103225>

5. Khodabakhshian N., Lee K. G., Marawi T., Sorkhou M., Vyravanathan S., Harnett N. Virtual Reality for Developing Patient-Facing Communication Skills in Medical and Graduate Education: Protocol for a Scoping Review. *JMIR Research Protocols. JMIR Publications Inc.* 2024, January 1. <https://doi.org/10.2196/53901>
6. Kurt A., Cirban Ekrem E., Akkoç B., Dinç F. Barriers experienced by nurses in communication for sexual health education for children with intellectual disability: a qualitative study. *International Journal of Developmental Disabilities.* 2024. 70(2). Pp. 306–314. <https://doi.org/10.1080/20473869.2023.2179745>
7. Xiaoyan W., Zainudin S. S. S., Yaakup H. S. Intercultural Communication Competence Among Higher Education International Students: A Systematic Literature Review. *Migration Letters.* 202. 21(4). pp 712–725. <https://doi.org/10.59670/ml.v21i4.7683>
8. Hao Y. Design and application of an intelligent communication platform for aesthetics education for internationalization. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences.* 2024. 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns.2023.1.00353>
9. Tratnik A., Gak D., Baggia A., Jerebic J., Rajković U., Grbić T., ... Žnidaršič A. Factors influencing student-professor email communication in higher education. *Education and Information Technologies.* 2024. 29(3). Pp. 3497–3523. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-11944-w>
10. Ramseier C. A., Hübschi C., Crnić T., Woelber J. P. Implementation of a communication curriculum in undergraduate dental education—students’ opinions during a 5-year development phase. *European Journal of Dental Education.* 2024. 28(1). Pp. 227–235. <https://doi.org/10.1111/eje.12940>
11. Chakraborty P., Mittal P., Gupta M. S., Yadav S., Arora A. Opinion of students on online education during the COVID-19 pandemic. *Human Behavior and Emerging Technologies.* 2021. 3(3). Pp. 357–365. <https://doi.org/10.1002/hbe2.240>
12. Fernández-Batanero J. M., Montenegro-Rueda M., Fernández-Cerero J., Tadeu P. Online education in higher education: emerging solutions in crisis times. *Heliyon. Elsevier Ltd.* 2022, August 1. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10139>
13. Jiang Y., Shang J., Jiao L. (2023, February 1). Review of China’s Online Education Policy, 1999–2022. ECNU Review of Education. SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/20965311221099581>
14. Holik I., Kersánszki T., Molnár G., Sanda I. D. Teachers’ Digital Skills and Methodological Characteristics of Online Education. *International Journal of Engineering Pedagogy.* 2023. 13(4). Pp. 50–65. <https://doi.org/10.3991/ijep.v13i4.37077>
15. Puu S., Idowu S. O., Meghisan-Toma G. M., Bădîrcea R. M., Doran N. M., Manta A. G. Online Education Management: A Multivariate Analysis of Students’ Perspectives and Challenges during Online Classes. *Electronics (Switzerland).* 2023. 12(2). <https://doi.org/10.3390/electronics12020454>
16. Szabó. K., Varga. E., Juhász. T. Higher Education Experience in the Shadow of COVID-19: The Hungarian Online Education. *European Journal of Contemporary Education.* 2023. 12(2). Pp. 629–645. <https://doi.org/10.13187/ejced.2023.2.629>
17. He X., Song N. Emotional Value in Online Education: A Framework for Service Touchpoint Assessment. *Sustainability (Switzerland).* 2023. 15(6). <https://doi.org/10.3390/su15064772>
18. Huang X., Li H., Huang L., Jiang T. Research on the development and innovation of online education based on digital knowledge sharing community. *BMC Psychology.* 2023. 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-023-01337-6>
19. Cramarenco R. E., Burcă-Voicu M. I., Dabija D. C. Student Perceptions of Online Education and Digital Technologies during the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review. *Electronics (Switzerland).* MDPI. 2023, January 1. <https://doi.org/10.3390/electronics12020319>
20. Samarakkody A., Senanayake A. C., Malalgoda C., Amaratunga D., Haigh R., Liyanage C., ... Shaw R. Inclusivity in online and distance disaster education: A review of educators’ views. *Progress in Disaster Science.* 2023. 20. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100298>
21. Yang C., Yuan J. Emergency online education policy and public response during the pandemic of COVID-19 in China. *Asia Pacific Journal of Education.* 2023. 43(4). Pp. 1015–1030. <https://doi.org/10.1080/02188791.2021.1987187>
22. Salama R., Hinton T. Online higher education: current landscape and future trends. *Journal of Further and Higher Education.* 2023. 47(7). Pp. 913–924. <https://doi.org/10.1080/0309877X.2023.2200136>
23. Ozturk N., Ekiz B., Kilic H. I., Ozcan M. Online Education Experiences of Veterinary Medicine Students and Effect on Students’ Burnout. *Acta Veterinaria Eurasia.* 2023. 49(1). Pp. 44–54. <https://doi.org/10.5152/actavet.2023.22065>
24. Wang W., Hammerton J. Optimization of journalism communication digital education ecology based on SEM model. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences.* 2024. 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns.2023.2.00159>
25. Statista. Online Education – Worldwide. 2024. URL: <https://www.statista.com/outlook/emo/online-education/worldwide#revenue>

Shusta V.I., Biganych V.Yu., Shusta V.S., Yevych M.Ya., Shusta V.Yu. ELECTRONIC COMMUNICATIONS IN EDUCATION: FROM DISTANCE LEARNING TO ONLINE RESOURCES

The article is devoted to the study of the role of electronic communications in the transformation of the educational process in the context of digitalization and globalization. Key technologies, such as learning management systems (LMS), cloud services, video conferencing and artificial intelligence tools, are considered, which provide new opportunities for distance learning and online resources. Current trends in financing online education, its development until 2027 and its importance for ensuring the accessibility of knowledge are analyzed. Particular attention is paid to the development of specialized platforms, in particular startups, which focus on adaptive learning models and professional certification. The article focuses on the impact of globalization on the development of electronic communications in education, which ensure the adaptation of educational processes to modern challenges. The implementation of innovative technologies, such as artificial intelligence (AI) and virtual reality (VR/AR), which form interactive and personalized learning environments, is analyzed in detail. Examples of leading platforms that have become drivers of change are considered, in particular Coursera, Khan Academy and Duolingo, as well as their importance for the development of professional competencies in the digital age. The conclusion is made that electronic communications are not only a means of learning, but also a tool for increasing the efficiency of educational process management and expanding access to knowledge on a global scale. Prospects for further research in the field of electronic communications are identified, aimed at integrating technologies into traditional educational structures and developing inclusive access to education for all segments of the population. The article also reveals the importance of a powerful digital infrastructure for the effective implementation of innovations in the field of education. The root causes of the emergence of electronic communications, their evolution and prospects for further development of technologies in 2027–2028 are highlighted. The key challenges and opportunities that electronic communications provide in the modern educational ecosystem are highlighted. The potential of new technologies for increasing the inclusiveness of education and global integration of knowledge is outlined.

Key words: electronic communications; distance learning; online resources; artificial intelligence; educational platforms; globalization of education.

Тихонов М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кононова І.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ДВОСТОРОННІХ ОЦІНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

Оцінка показників надійності складних технічних систем, до яких відноситься і комунікаційне обладнання сучасних мереж зв'язку, на етапах створення та експлуатації здійснюється, як правило, в умовах апріорної невизначеності вихідних даних. Наявність невизначеності (неповноти, недостовірності) вихідної інформації при розв'язанні задач оцінки показників надійності комунікаційного обладнання обумовлено тим, що в багатьох випадках не представляється можливим отримати достатньо великий об'єм вибірки випадкових величин, що характеризують безвідмовність, ремонтпридатність та процес функціонування досліджуваної системи.

Предметом теоретичного дослідження є процеси функціонування комунікаційного обладнання в умовах обмеженої надійності програмних засобів. Метою роботи є розробка удосконаленої методики побудови двосторонніх оцінок (нижніх та верхніх границь) показників надійності функціонування об'єктів комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу при обмеженій вихідній інформації. Запропоновано удосконалену методику, в основі якої покладено використання математичних моделей оцінки надійності, отриманих при повній вихідній інформації. Сутність удосконалення методики, що визначає її новизну та відмінність від відомих, полягає у виборі нового базового функціоналу, який характеризує вплив відмов та збоїв на надійність функціонування та входить у формули для показників надійності комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу, і побудові нижньої та верхньої границь цього функціоналу з наступним отриманням двосторонніх оцінок показників надійності комунікаційного обладнання шляхом підстановки в них граничних значень базового функціоналу.

Удосконалена методика дає можливість побудувати нові математичні моделі надійності, теоретичне дослідження яких дозволяє провести комплексну оцінку надійності функціонування комунікаційного обладнання при сумісному урахуванні поповнюваної та непоповнюваної складових комбінованого резерву часу, різних типів відмов і збоїв та їх наслідків.

Ключові слова: програмні засоби, показники надійності, збої, відмови, комунікаційне обладнання, комбінований резерв часу.

Постановка проблеми. На етапах розробки та використання складних технічних систем, як правило, доводиться оцінювати показники надійності в умовах апріорної невизначеності вихідних даних. Під терміном “апріорна невизначеність” зазвичай розуміють відсутність або наявність неповної інформації про закони розподілу випадкових величин, які характеризують надійність окремих елементів, складових частин або системи в цілому, а також процес її функціонування [1]. Неповнота інформації характеризується також можливою відсутністю відомостей про залежності елементів системи. Це типове явище, з яким стикаються практично на всіх етапах життєвого циклу складних технічних систем. В таких випад-

ках отримати точні значення показників надійності досліджуваної системи не представляється можливим, а задача полягає в знаходженні двосторонніх оцінок (точних нижніх та верхніх границь) цих показників, коли невідомі функції розподілу вихідних випадкових величин належать деякій фіксованій множині розподілів. Тому, виникає необхідність подальшого розвитку в прикладному плані загального аналітичного розв'язання задачі знаходження екстремальних функцій розподілу для розрахунку нижніх та верхніх границь функціоналів, які характеризують надійність функціонування КО з комбінованим резервом часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання оцінки показників надійності КО та забез-

печення їх високого рівня розглядалися в роботах вітчизняних та закордонних вчених [2–6].

В розглянутих наукових працях прийняте допущення про повну та достовірну вихідну інформацію, що не завжди виконується на практиці. Частіше доводиться зіткнутись із ситуацією, коли функції розподілу вихідної інформації випадкових величин невідомі, а визначені лише деякі їх числові характеристики, наприклад, перші два початкові моменти.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка удосконаленої методики побудови двосторонніх оцінок показників надійності функціонування об'єктів КО з комбінованим резервом часу.

Виклад основного матеріалу. В основі запропонованої удосконаленої методики покладено розглянутий в [7] аналітичний метод визначення двосторонніх оцінок показників надійності об'єктів при обмеженій вихідній інформації, який використовується для дослідження надійності систем з комбінованим резервом часу (t_d, t_p) , що містить поповнювану t_d та непоповнювану t_p складові загального часового резерву. Аналіз особливостей функціонування таких систем, проведений у [8], показує, що поповнювана складова t_d використовується на першому етапі перевірки часових обмежень $(t_b \leq t_d)$ після виникнення відмови та витрачається при відновленні працездатного об'єкту. Тому у функціонал, характеризуючий безвідмовність об'єкту (будемо його називати базовим функціоналом), входить в якості вихідних даних функція розподілу часу t_b відновлення $F_b(t)$, точний вид якої невідомий, а визначені тільки два початкових моменти цієї випадкової величини.

Таким чином, сутність запропонованої методики полягає у виборі нового базового функціоналу, який характеризує вплив на надійність КО збоїв та відмов і входить в показники надійності об'єктів з комбінованим резервом часу, отримані при повній вихідній інформації, і побудові точних нижніх та верхніх границь цього функціоналу при відомих початкових моментах часу відновлення працездатності об'єкта з подальшим отриманням двосторонніх оцінок (нижніх та верхніх границь) показників надійності функціонування КО шляхом підстановки в них граничних значень базового функціоналу.

В загальному випадку реалізація даної методики включає в себе виконання наступних етапів:

1. Вибір типових функціоналів, характеризуючих надійність резервованих систем;

2. Побудова для даних функціоналів точних нижніх та верхніх границь;

3. Отримання двосторонніх оцінок (нижньої та верхньої границь) показників надійності резервованих систем шляхом підстановки граничних значень функціоналів у формули, отримані при повній вихідній інформації.

Аналіз показав, що найбільш складною є реалізація другої задачі.

Розглянемо її розв'язання більш детально. Побудова двосторонніх оцінок (нижніх і верхніх границь) для базового функціоналу. Аналіз показав, що отримана у [9] при повній вихідній інформації сукупність нових розрахункових формул для основних показників надійності об'єктів з комбінованим резервом часу містить базовий лінійний функціонал, що характеризує безвідмовність об'єкта при використанні поповнюваної складової t_d загального резерву часу (t_d, t_p) . Цей функціонал має вид:

$$I(F_b) = F_b(t_d) = \int_0^{t_d} dF_b(x) = \int_0^{t_d} g(x, t_d) dF_b(x), \quad (1)$$

де

$$g(x, t_d) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 0 \leq x < t_d, \\ 0, & \text{якщо } x \geq t_d. \end{cases}$$

Нехай закон розподілу $F_b(x)$ довільний і вид його невідомий, а визначені лише два його початкових моменти $s_1 = \int_0^\infty x dF_b(x)$ та $s_2 = \int_0^\infty x^2 dF_b(x)$. Позначимо через K_2 множину функцій розподілу $F_b(x)$ таких, що $F_b(0) = 0$; $\int_0^\infty dF_b(x) = 1$; $\int_0^\infty x^i dF_b(x) = s_i$, $i = 1, 2$; $0 < s_1^2 < s_2 < \infty$.

Необхідно знайти точні нижню $\inf_{F_b \in K_2} I(F_b)$ та верхню $\sup_{F_b \in K_2} I(F_b)$ границі функціоналу $I(F_b)$ з використанням необхідних та достатніх умов існування екстремуму лінійних функціоналів [9]. Запис $F_b \in K_2$ означає, що невідома функція розподілу $F_b(x)$ належить множині функцій розподілу $K_2(s_1, s_2)$ позитивних випадкових величин з фіксованими початковими моментами s_1 та s_2 . Нижче наводиться розв'язання цієї задачі.

Нижні та верхні оцінки функціоналу $I(F_b)$ для різних областей змін величини резерву часу t_d наведено в табл. 1.

При отриманні цих оцінок використані результати, наведені в [9], за допомогою яких можна показати, що ступенева функція розподілу $I_0(x)$ з точкам росту x_1, x_2, x_3 є граничною, якщо багаточлен $U_0(x) = u_1 + u_2x + u_3x^2$ задовольняє умові $U_0(x) \leq g(x, t_d)$ для всіх $x \geq 0$ при пошуку міні-

Нижні та верхні оцінки функціоналу $I_1(F_B)$

Зміна параметру t_d	$\inf_{F_B \in K_2} I_1(F_B)$	Точки зростання граничної функції розподілу $F_0(x)$	Граничні багаточлени $U_0(x)$	$\sup_{F_B \in K_2} I_1(F_B)$	Точки зростання граничної функції розподілу $F_0(x)$	Граничні багаточлени $U_0(x)$
$0 < t_d < s_1$	0	$x_1 = t_d,$ $x_2 = n,$ $n \rightarrow \infty$	$U_0(x) = 0$	$\frac{s_2 - s_1^2}{s_2 - 2s_1 t_d + t_d^2}$	$x_1 = t_d,$ $x_2 = \frac{s_2 - s_1 t_d}{s_1 - t_d}$	$U_0(x) = \frac{(x - x_2)^2}{(t_d - x_2)^2}$
$s_1 \leq t_d < \frac{s_2}{s_1}$	$\frac{t_d - s_1}{t_d}$	$x_1 = 0,$ $x_2 = t_d$	$U_0(x) = 1 - \frac{x}{t_d}$	1	$x_1 = 0,$ $x_2 = t_d$	$U_0(x) = 1$
$t_d \geq \frac{s_2}{s_1}$	$\frac{(t_d - s_1)^2}{s_2 - 2s_1 t_d + t_d^2}$	$x_1 = \frac{s_1 t_d - s_2}{t_d - s_1},$ $x_2 = t_d$	$U_0(x) = 1 - \frac{(x - x_1)^2}{(t_d - x_1)^2}$	1	$x_1 = \frac{s_1 t_d - s_2}{t_d - s_1},$ $x_2 = t_d$	$U_0(x) = 1$

мального значення інтегралу (3.3) (або умові $U_0(x) \geq g(x, t_d)$ при пошуку максимального значення цього інтегралу). Коефіцієнти цього багаточлену $u_i, i = \overline{1, 3}$, визначаються з рівності $g(x, t_d) = U_0(x)$. Для наочності на рис. 1 та рис. 2 наведено графіки зміни від x функції $g(x, t_d)$ (суцільні лінії) та граничного багаточлена $U(x)$ (пунктирні лінії) для різних областей зміни t_d (на осі виділено точки зростання граничної функції розподілу $F_0(x)$). Ці графіки можуть бути доказом виконання умови $\underline{U}_0(x) \leq g(x, t_d)$ (при пошуку мінімального значення інтегралу (1)) або умови $\overline{U}_0(x) \geq g(x, t_d)$ (при пошуку максимального значення цього інтегралу).

Так, наприклад, в області $0 < t_d < s_1$ гранична функція розподілу $F_0(x)$ має точки росту $x_1 = t_d, x_2 = n, n \rightarrow \infty$, граничний багаточлен $U_0(x) = 0$, а мінімальне значення інтегралу (1) $\inf_{F_B \in K_2} I(F_B) = 0$. При $s_1 \leq t_d < \frac{s_2}{s_1}$ гранична функція розподілу має точки росту $x_1 = 0, x_2 = t_d$. Отже, рівняння граничного багаточлену $U_0(x)$ матиме вид $U_0(x) = 1 - \frac{x}{t_d}$ (рис. 1). Мінімальне значення інтегралу (1) буде мати вид $\inf_{F_B \in K_2} I(F_B) = \frac{t_d - s_1}{t_d}$. Аналогічно доводиться решта результатів, представлені в табл. 1. Розглянемо ситуацію, коли випадкова величина t_b з функцією розподілу $F_B(x)$ не може приймати значень, більших t_b^* , тобто $0 < t_b \leq t_b^*$, де t_b^* – максимальний час відновлення, визначається умовами експлуатації об'єктів, кваліфікацією обслуговуючого персоналу та іншими факторами ($0 < t_b^* \leq \infty$). Нехай функція розподілу

$F_B(x) = P\{t_b < x\}$, як і раніше, невідома, а відомо лише, що вона належить класу K_2^* :

$$K_2^* = \left\{ F_B : F_B(0-) = 0; F_B(t_b^*+) = 1; \int_0^{t_b^*} x^i dF_B(x) = s_i, i = \overline{1, 2}; 0 < s_1^2 < s_2 < s_1 t_b^* \right\}.$$

В цьому випадку формули для двосторонніх оцінок функціоналу $I(F_B)$ приймає вид:

$$\inf_{F_B \in K_2} I(F_B) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t_d \leq s_1, \\ 1 + \frac{s_2 - s_1(t_d + t_b^*)}{t_d t_b^*} & \text{при } s_1 < t_d < \frac{s_2}{s_1}, \\ \frac{(t_d + s_1)^2}{s_2 - 2t_d s_1 + t_d^2} & \text{при } t_d > \frac{s_2}{s_1}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\sup_{F_B \in K_2} I_1(F_B) = \begin{cases} \frac{s_2 - s_1^2}{s_2 - 2t_d s_1 + t_d^2} & \text{при } 0 < t_d < s_1, \\ 1 - \frac{s_2 - s_1 t_d}{t_b^* (t_b^* - t_d)} & \text{при } s_1 \leq t_d < s_2/s_1, \\ 1 & \text{при } t_d \geq s_2/s_1. \end{cases} \quad (3)$$

Формули (2) та (3) справедливі $t_d < t_b^*$. Якщо інформація про функції розподілу $F_B(x)$ обмежена значенням тільки лише середнього значення

$$s_1 = \int_0^\infty [1 - F_B(x)] dx,$$

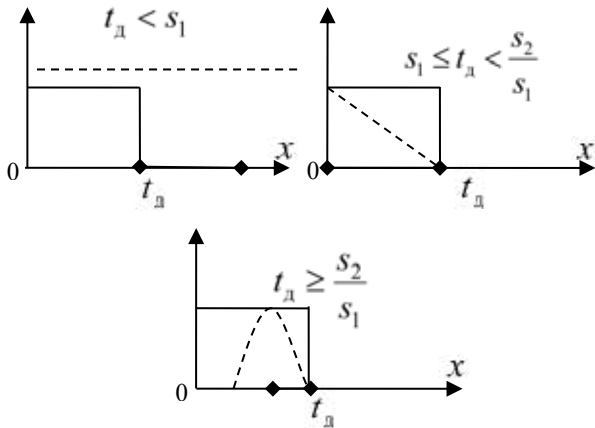


Рис. 1. Графіки зміни від функції $g(x, t_d)$ (суцільні лінії) та граничного багаточлена $U(x)$ (пунктирні лінії) під час пошуку мінімального значення інтегралу (1)

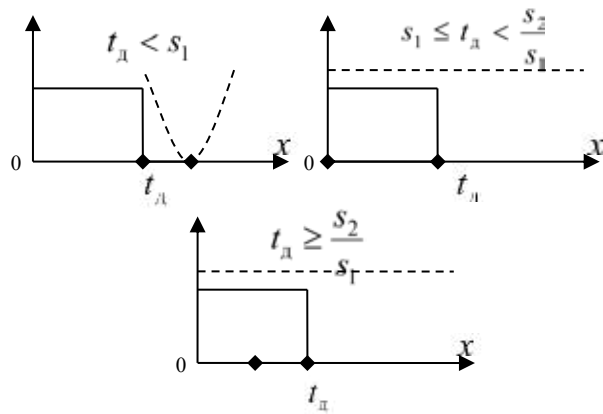


Рис. 2. Графіки зміни від x функції $g(x, t_d)$ (суцільні лінії) та граничного багаточлена $U(x)$ (пунктирні лінії) під час пошуку максимального значення інтегралу (1)

тоді двосторонні оцінки функціоналу $I(F_b)$ мають вид:

$$\inf_{F_b \in K_2} I(F_b) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t_d \leq s_1, \\ \frac{t_d - s_1}{t_d} & \text{при } t_d > s_1, \end{cases}$$

$\sup_{F_b \in K_2} I(F_b) = 1$ при всіх можливих співвідношеннях s_1 і t_d .

Таким чином, отримані результати реалізації перших двох етапів запропонованої удосконаленої методики – нижня та верхня границі базових функціонала $I(F_b)$ (формула (1)), які дають можливість отримати двосторонні показники надійності функціонування КО з комбінованим резервом часу в умовах апіорної невизначеності.

Висновки. Запропоновано удосконалену методику побудови двосторонніх оцінок (нижніх і верхніх границь) показників надійності КО з комбінованим резервом часу, в основі якої покладено використання математичних моделей оцінки надійності, отриманих при повній вихідній інформації. Сутність удосконалення методики, що визначає її новизну та відмінність від відомих, полягає у виборі нового базового функціоналу, який характеризує вплив відмов та збоїв на надійність функціонування та входить у формули для показників надійності КО з комбінованим резервом часу, і побудові нижньої та верхньої границь цього функціоналу з наступним отриманням двосторонніх оцінок показників надійності КО шляхом підстановки в них граничних значень базового функціоналу.

Список літератури:

1. Креденцер Б.П., Вишнівський В.В., Жердев М.К., Могилевич Д.І. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації: монографія. Київ: Фенікс, 2013. 336 с.
2. Yakovyna V.S., Seniv M.M., Symets I.I. Sambir Algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020, vol. 4. P. 163–177. DOI:10.15588/1607-3274-2020-4-16
3. Яковина В., Мацелюх В. Огляд і аналіз моделей надійності програмного забезпечення. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2017. № 771. С. 130–140. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPKNIT_2013_771_17.
4. Zhong W., Wang L., Liu Z., Hou S. Reliability Evaluation and Improvement of Islanded Microgrid Considering Operation Failures of Power Electronic Equipment. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2020. Vol. 8, № 1. P. 111–123. DOI:10.35833/MPCE/2018.000666.
5. Kaner C., Falk J., Hung Q. Nguyen Testing computer software. *John Wiley and Sons*. 1999. 496 p. URL: <https://anyflip.com/ulhe/svme/basic/51-81>.
6. Raghuvanshi K., Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model. *SN Appl*. 2021. Vol. 18. DOI:10.1007/s42452-020-04015-z.
7. Mogylevych D.I. Kononova I.V. Improved Estimates for the Reliability Indicators of Information and Communication Network Objects with Limited Source Information. *Advances in Information and Communication*

Technologies. UKRMICO 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer. 2018. Vol. 560. P. 101–117. DOI: 10.1007/978-3-030-16770-7_5.

8. Могилевич Д.І., Сінько В.В. Моделі надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання з незнеціненими або повністю знеціненими відмовами програмних засобів. *Information Technology and Security*. 2022. Vol. 10. P. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261132>.

9. Mogylevych D., Kredentser B., Kononova I., Mohylevych V. Analytical Model with Interruption of Service of Short-term Objects with Temporary Reservation. *IT&I-2020 Information Technology and Interactions*. 2020. P. 295 – 307. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2845/Paper_28.pdf.

Tykhonov M.V., Kononova I.V. AN IMPROVED METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING BILATERAL RELIABILITY ESTIMATES OF COMMUNICATION DEVICES WITH A COMBINED TIME RESERVE

Assessment of reliability indicators of complex technical systems, which include communication equipment of modern communication networks, at the stages of creation and operation is usually carried out under conditions of a priori uncertainty of the initial data. The presence of uncertainty (incompleteness, unreliability) of the initial information when solving problems of assessing the reliability of communication equipment is due to the fact that in many cases it is not possible to obtain a sufficiently large sample size of random variables characterizing the reliability, maintainability and operation of the system under study.

The subject of the theoretical study is the processes of functioning of communication equipment in conditions of limited reliability of software. The aim of the work is to develop an improved methodology for constructing bilateral estimates (lower and upper limits) of the reliability indicators of the functioning of communication equipment with a combined time reserve with limited initial information. An improved methodology is proposed, based on the use of mathematical models for assessing reliability obtained with complete initial information. The essence of improving the methodology, which determines its novelty and difference from the known ones, is to select a new basic functionality that characterizes the impact of failures and failures on the reliability of operation and is included in the formulas for reliability indicators of communication equipment with a combined time reserve, and to build the lower and upper limits of this functionality with the subsequent obtaining of two-sided estimates of the reliability of communication equipment by substituting the boundary values of the basic functionality.

The improved methodology makes it possible to build new mathematical models of reliability, theoretical study of which allows for a comprehensive assessment of the reliability of communication equipment with joint consideration of the replenishable and non-replenishable components of the combined time reserve, various types of failures and failures and their consequences.

Key words: *software, reliability indicators, failures, failures, communication equipment, combined time reserve.*

УДК 621.372

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/14>**Шевцов К.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Живков О.П.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МІКРОХВИЛЬОВІ МЕТАМАТЕРІАЛЬНІ СТРУКТУРИ НА БАЗІ SIW ХВИЛЬОВОДІВ ТА РЕЗОНАТОРІВ

У статті розглянуто мікрохвильові структури на основі SIW-резонаторів і хвильоводів, що включають діелектричні резонатори, розташовані в області еліптичної поляризації основного типу хвилі. Діелектричні резонатори розміщуються як у наскрізних отворах SIW структур, так і на їхній діелектричній поверхні в області спеціально створених «вікон» в металевих стінках.

У статті визначено, що збудження в діелектричних резонаторах одночасно двох ортогональних, зміщених по фазі на 90° коливань, які, у загальному випадку, розстроєні по частоті через вплив оточуючих металевих поверхонь, призводить до формування характеристик, притаманних метаматеріальним мікрохвильовим структурам. Продemonстровано характеристики типу резонансу Фано.

Зазначається, що такого роду структури можуть бути використані як мікрохвильові сенсори, антени та ректени. Розглянуто структуру ректен, їх основні компоненти. У статті визначено один із нових перспективних напрямків використання мікрохвильових антенн в даний час, в якості ректен – приймальних антен у пристроях збору та накопичення мікрохвильової енергії.

У статті продемонстровано властивості (спрямованість, висока вибірковість) подібних пристроїв, які пізніше знайшли застосування в комірках метаматеріалів. У статті розглянуто як збуджені коливання можуть мати не лише різні резонансні частоти, а й різні ступені зв'язку з лінією передачі (коефіцієнти зв'язку) і різні власні добротності, що зумовлено, наприклад, різними ступенями впливу на них металевих стінок резонаторів.

Визначено, що при розміщенні в областях еліптичної поляризації цих структур діелектричних резонаторів у них збуджуються ортогональні коливання, зміщені по фазі на 90° , які за відповідних розладів частоти та рівнів зв'язку із SIW-структурами можуть реалізовувати характеристики пристроїв у вигляді резонансу Фано, що свідчить про їх метаматеріальні властивості. Продemonстровано як експериментальні характеристики подібних пристроїв, так і теоретичні, отримані на основі адекватних електродинамічних і математичних моделей.

Ключові слова: метаматеріали, SIW резонатори, SIW хвильоводи, діелектричний резонатор, ректена.

Постановка проблеми. Розробка ефективних мікрохвильових структур з метаматеріальними властивостями: так як мікрохвильові структури на основі SIW (Substrate Integrated Waveguide) з використанням діелектричних резонаторів мають потенціал для реалізації метаматеріальних характеристик, зокрема резонансу Фано. Проблемою є розуміння фізичних механізмів і умов для збудження цих характеристик, а також розробка відповідних моделей, що дозволять прогнозувати поведінку таких структур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З початку цього століття в мікрохвильовій техніці з'явилися нові пристрої як на основі метаматеріалів, так і на базі SIW (Substrate Integrated

Waveguide) структур [6], а згодом і пристрої, що об'єднують обидва ці компоненти [7]. При цьому як комірки метаматеріалів досі розглядалися так звані SRR (Split Ring Resonators) і CSRR (Complimentary Split Ring Resonators) резонатори. Однак останніми роками з'явилися публікації, присвячені новому типу 3D комірок метаматеріалів, сформованих мікрополосковими та діелектричними резонаторами (ДР) [1].

Водночас ще наприкінці 80-х років минулого століття були опубліковані матеріали [2], в яких досліджувалися характеристики хвильоводних структур з ДР, розташованими в області еліптичної поляризації. Було продемонстровано властивості (спрямованість, висока вибірковість)

подібних пристроїв, які пізніше знайшли застосування в комірках метаматеріалів. Оскільки в SIW-хвильоводах і резонаторах структура електромагнітного поля близька до структури поля хвилі Н01 прямокутного хвильоводу, дослідження властивостей аналогічних пристроїв на основі SIW-структур із ДР у галузі кругової поляризації є актуальним.

Постановка завдання. Мета статті – дослідження властивостей мікрохвильових компонентів, створених на основі SIW-хвильоводів, резонаторів та ДР, розташованих у областях їхньої еліптичної поляризації, з метою демонстрації можливості реалізації такого роду характеристик, які прийнято відносити до метаматеріальних (надвисока добротність, спрямованість). Мету можна сформулювати так – дослідження нового типу 3D комірок метаматеріалів на основі SIW-структур і ДР.

Виклад основного матеріалу.

S-параметри комірок метаматеріалу. У [3] наведено параметри матриці розсіювання метаматеріальної комірки, що складається з двох резонаторів, загалом різного типу (наприклад, ДР і мікрополоскового), з різними добротностями, а також із різними резонансними частотами:

$$S_{11} = \frac{K_2^*}{1 + K_2^*} - \frac{K_1^*}{1 + K_1^*} \quad (1)$$

$$S_{21} = 1 - \frac{K_1^*}{1 + K_1^*} - \frac{K_2^*}{1 + K_2^*} \quad (2)$$

Де

$$K_i^* = \frac{K_i}{1 + j \cdot \xi_i} \quad (3)$$

$$K_i = \frac{Q_{0i}}{Q_{exti}} \quad (4)$$

$$\xi_i = J \cdot Q_i \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_i} - \frac{\omega_i}{\omega} \right) \quad (5)$$

$$\omega_i = 2 \cdot \pi \cdot f_i \quad (6)$$

Де Q_{0i} ненавантажена добротність i -го резонатора, Q_{exti} зовнішня добротність i -го резонатора f_i – резонансна частота коливання i -го резонатора

Слід зазначити, що ці ж формули можуть застосовуватися не тільки до різних резонаторів, а й до ортогональних коливань одного й того ж резонатора, які можуть збуджуватися в області еліптичної поляризації хвильоводів або інших мікрохвильових ліній передачі, наприклад, у резонаторах кубічної форми.

У подібному випадку збуджені коливання можуть мати не лише різні резонансні частоти, а й різні ступені зв'язку з лінією передачі (коефіцієнти зв'язку) і різні власні добротності, що зумовлено, наприклад, різними ступенями впливу на них металевих стінок резонаторів. У цьому випадку збудження двох ортогональних коливань, зсунутих також і за фазою на 90° , еквівалентне ортогональному розташуванню двох циліндричних ДР в одному перерізі прямокутного хвильоводу [2].

На Рис. 1 для ілюстрації сказаного представлені отримані за допомогою розробленої нами програми «Filter Response Visualization Tool» теоретичні характеристики подібного кубічного ДР в області еліптичної поляризації прямокутного хвильоводу. Параметри коливань, використані при аналізі за допомогою формул (1-6), аналогічні параметрам коливань двох окремих ДР з [2] і представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри коливань модельованого ДР

	Рез. 1	Рез. 2
Резонансна частота, ГГц	9.34	9.36
Коефіцієнт зв'язку	2.3	2.55
Добротність	1100	1000

Джерело: побудовано автором

Як видно, збуджувані одночасно ортогональні коливання (червоне та зелене на Рис. 1) можуть

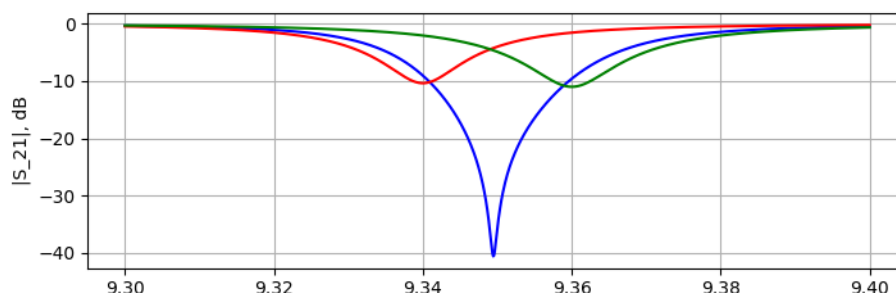


Рис. 1. Інтерференція двох коливань ДР в області еліптичної поляризації прямокутного хвильоводу

Таблиця 2

Параметри коливань модельованої комірки метаматеріалу

	Рез. 1	Рез. 2
резонансна частота, ГГц	8	8.5
Коефіцієнт зв'язку	5.21	5
Добротність	85	80

Джерело: побудовано автором

мати різні резонансні частоти, добротності та ступені зв'язку з хвильоводом, але при деяких їх комбінаціях вони можуть спільно реалізовувати характеристику загасання, що має форму резонансу Фано 5. Наведений приклад знадобиться нам у подальшому для ілюстрації механізму формування вироджених коливань в SIW хвильоводах і резонаторах з ДР.

Діелектричний резонатор в SIW хвильоводі.

На Рис. 2 представлена топологія комірки метамеханізму, утворена відрізком SIW хвильоводу і ДР, розташованим у сквозному отворі хвильоводу в області еліптичної поляризації хвилі H01, змодельовано у програмному комплексі CST.

Структура електромагнітного поля всередині SIW хвильовода подібна структурі поля в прямокутному хвильоводі [6].

На Рис. 3 представлені характеристики розглянутої комірки метаматеріалу, отримані як на основі електродинамічної моделі (Рис. 3 а), так і так і на основі S-параметрів (Рис. 3 б), формули (1)–(6).

Відповідність результатів моделювання свідчить про адекватність використаних моделей. При порівнянні характеристик різних досліджуваних структур (сині криві на Рис. 1 та Рис. 3 б) важливо зауважити, що ширина смуги по рівню – 20 дБ для ДР у прямокутному хвильоводі (Рис. 1) приблизно в 25 разів менша ширини смуги характеристики ДР в SIW хвильоводі (рис. 3), при тому, що в обох випадках використовувалися ДР з власною добротністю одного порядку (1000-1500). Це пов'язано з тим, що в відомій формулі, що зв'язує навантажену Q_L , власну Q_O та зовнішню Q_{ext} добротності, для врахування втрат, пов'язаних

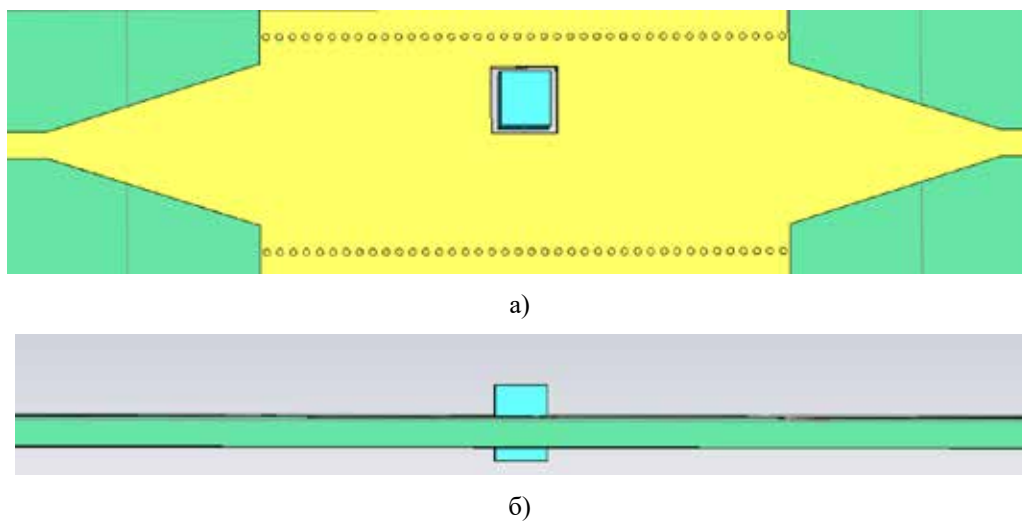


Рис. 2. ДР в формі паралелепіпеда, близького к кубу, а) – вид сверху, б) – вид сбоку

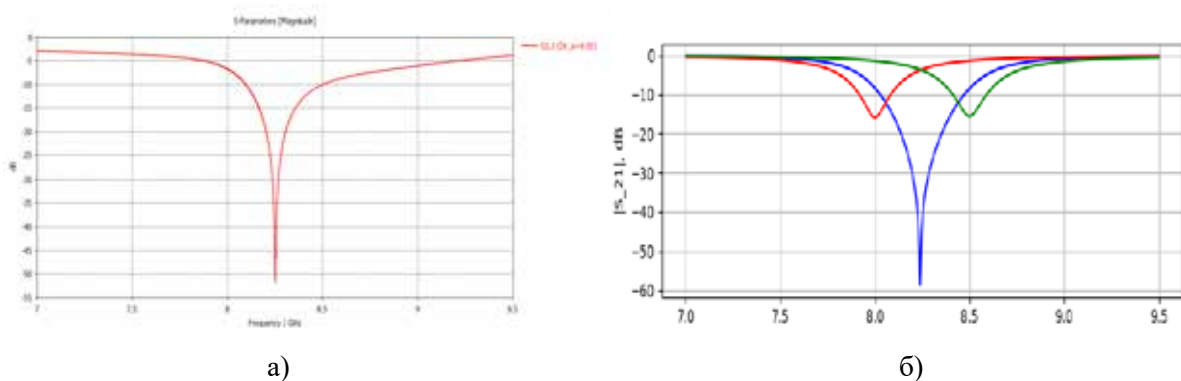


Рис. 3. Резонанс кубического ДР в области эллиптической поляризации SIW волновода

з випромінюванням резонатора, слід додати ще й складову Q_{rad} – радіаційну добротність:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_{ext}} + \frac{1}{Q_o} + \frac{1}{Q_{rad}} \quad (7)$$

У закритому прямокутному хвилеводі Q_{rad} дуже велике в порівнянні з Q_o і тому може не враховуватися. У структурі з SIW хвилеводом ДР досить сильно випромінює, і тому радіаційна добротність суттєво менша власної (втрати в ДР набагато менші втрат на випромінювання), і тому у формулі (7) власна добротність може не враховуватися. Саме впливом радіаційної добротності (з урахуванням і без урахування втрат на випромінювання) пояснюється суттєва різниця добротностей у таблицях 1 і 2. Досліджена структура може бути успішно використана в якості одного з датчиків, подібних до розглянутих у [7].

Мікрохвильові антени та ректени на основі ДР. Важлива роль метаматеріалів та пристроїв на їх основі в сучасній мікрохвильовій техніці детально представлена в [8], причому як найбільш перспективна область їх застосування виділені саме антени.

Одним із нових перспективних напрямків використання мікрохвильових антен в даний час є їх застосування в якості ректен – приймальних антен у пристроях збору та накопичення мікрохвильової енергії [9, 10]. Як правило, в мікрохвильовому діапазоні такого роду антени є мікрополосковими (найчастіше – патч-антенами).

Водночас порівняння властивостей (характеристик) мікрополоскових і діелектричних антен свідчить про те, що антени на базі діелектричних резонаторів можуть в цілому ряді випадків бути більш енергетично ефективними [11, 12]. Незважаючи на те, що антени на діелектричних резонаторах досить добре і всебічно досліджені, застосування саме їх у складі ректен представляється нам перспективним.

Ректена складається з кількох основних компонентів, які дозволяють їй перетворювати радіочастотну (RF) енергію на електричну.

Антенa. Основний елемент, який приймає радіочастотні сигнали. Антенa може бути різних типів залежно від частоти, на якій працює ректена. Зазвичай використовуються антени, які можуть захоплювати радіохвилі від різних джерел, таких як мобільні мережі, Wi-Fi чи телевізійні передавачі.

Схема узгодження. Пристрій або конфігурація, яка забезпечує оптимальне узгодження імпедансів між антенною (або ректенною) та навантаженням. Основна мета узгодження полягає в максимізації передачі енергії з одного пристрою в інший, зменшуючи відбиття сигналу.

Випрямляч. Компонент, що відповідає за перетворення змінного струму, отриманого від антени, на постійний струм. Найчастіше використовуються високочастотні діоди (діоди шотткі), які мають низьке пряме падіння напруги і можуть працювати на високих частотах, характерних для радіочастотних сигналів.

Корисне навантаження. Енергія, перетворена з радіочастотного сигналу, використовується для живлення корисного навантаження – пристрою, який використовує отриману електричну енергію, наприклад, датчик, мікроконтролер або акумулятор для заряджання.

Діелектричний резонатор в SIW резонаторі. Різні назви типів коливань «парні» і «непарні», так само як «синфазні» і «протифазні», а також «електричні» і «магнітні» можна в загальному випадку кваліфікувати як «нормальні» коливання в тому сенсі, як це представлено в класичній праці [13]. Там же зазначається, що можливий спосіб представлення «нормальних» коливань у вигляді ліво- і правооборотних векторів. У мікрополоскових конструкціях для збудження кругової поляризації в антенах використовуються квадратичні гібридні з'єднувачі [14, 15].

Для збудження такого роду ортогональних коливань придатні, як це продемонстровано вище, і SIW хвилеводи. В якості найбільш перспективної з технологічної точки зору, для побудови антен,

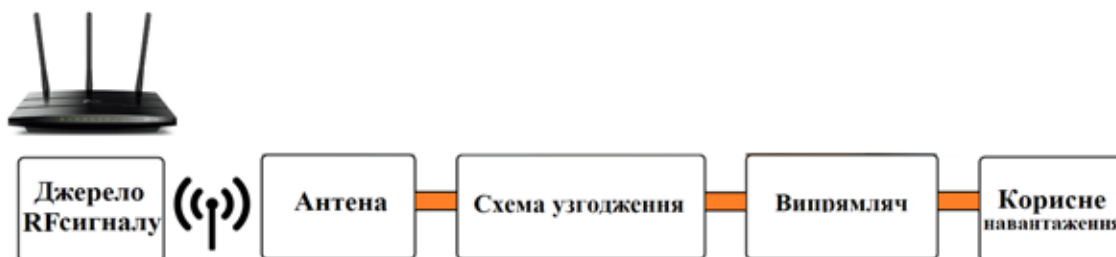


Рис. 4. Основні компоненти ректени

нами запропоновано конструкцію з ДР Рис. 5 а – фото, Рис. 5 б – модель в CST, розташованому на металевій стінці SIW резонатора в районі «вікна», вирізаного в області еліптичної поляризації поля SIW резонатора. Збудження двох близьких за частотою, але не співпадаючих в загальному випадку коливань у ДР досягається також і за рахунок несиметричного розташування ДР щодо металевих країв «вікна».

На Рис. 5 в) представлені експериментальні та теоретичні характеристики досліджуваної структури, яка в даному випадку є мікрохвильовою антеною з полосою пропускання за рівнем – 10 дБ (КСВН = 2) порядку 5%. Слід відзначити достатню відповідність експериментального зразка та електродинамічної моделі.

Для розширення смуги частот антени ДР був розміщений в дещо іншому положенні відносно вікна в стінці SIW хвилевода, так, щоб частоти збуджуваних з ДР ортогональних коливань були більше розстроєні за частотою і знімалося їх «виродження». При цьому ширина смуги частот за рівнем -10 дБ збільшилася до 8%.

У цьому варіанті для моделювання експериментальної характеристики використовувалася «математична» модель антени – тобто параметри матриці розсіяння (формули (1)–(7)), параметри, використані при моделюванні коливань, представлені в таблиці 3.

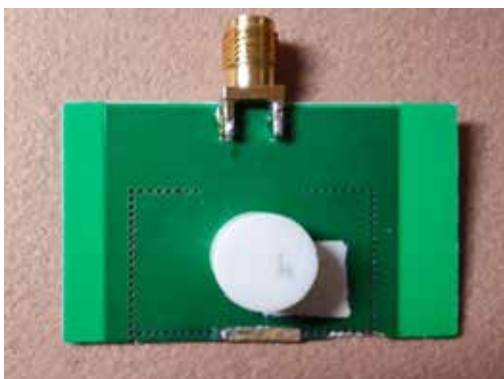
Таблиця 3

Параметри моделювання коливань

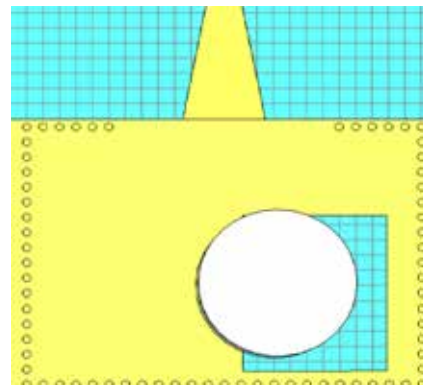
	Рез. 1	Рез. 2
Резонансна частота, ГГц	4.68	5
Коефіцієнт зв'язку	5	6
Добротність	90	90

Джерело: побудовано автором

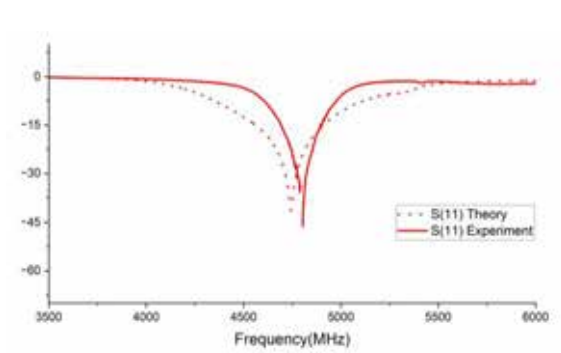
Висновки. Хвилеводи та резонатори на основі SIW-структур мають структуру поля, аналогічну полю хвилі Н01 прямокутного хвилеводу. При розміщенні в областях еліптичної поляризації цих структур діелектричних резонаторів у них збуджуються ортогональні коливання, зміщені по фазі на 90° , які за відповідних розладів частоти та рівнів зв'язку із SIW-структурами можуть реа-



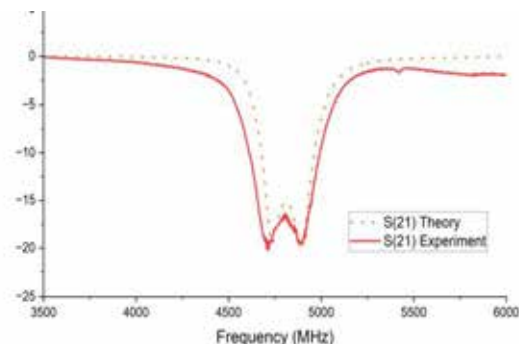
а)



б)



в)



д)

Рис. 5. Експериментальні та теоретичні характеристики мікрохвильової антени а) – фото, б) – модель в CST, в) та д) – експериментальні та теоретичні характеристики у режимі резонансу Фано та довільною розстройкою коливань

лізувати характеристики пристроїв у вигляді резонансу Фано, що свідчить про їх метаматеріальні властивості. SIW-резонатори з ДР на їхній поверхні в районі «вікон» із знятою металізацією досліджено як антени, отримані експериментальні характеристики добре відповідають «метаматеріальним» моделям подібних структур, представленим у статті. Таким чином, можна стверджувати, що в роботі теоретично та експериментально

досліджено мікрохвильові метаматеріальні осередки нового типу

Подяка. Робота проведена при підтримці Swedish Foundation for Strategic Research within the framework of SSF Project “Electromagnetic metamaterials for communications and sensing” (ID UKR24-0008) та NATO project SPS G6002 – “3D Metamaterials for Energy Harvesting and Electromagnetic Sensing”.

Список літератури:

1. M. Y. Ilchenko et al., “Microwave filter with an induced transparency window based on a modified split-ring resonator,” Ukraine Patent 150 190, Jan. 13, 2022.
2. Ilchenko, M.E., Zhivkov, A.P.: UHF devices based on several dielectric-cavity mode types. *Radioelectronics and Communications Systems* 32(5), 56-59 (1989).
3. M. Y. Ilchenko et al., «Modeling of Electromagnetically Induced Transparency With RLC Circuits and Metamaterial Cell,» in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 12, pp. 5104-5110, Dec. 2023, doi: 10.1109/TMTT.2023.3275653.
4. Ilchenko, M.E., Zhivkov, A.P., Orlov, A.T.: Filters based on resonators with modes similar in frequency as cells of metamaterials. *Naukovi Visti NTUU “KPI”* 104(1), 7–14 (2016).
5. Limonov, M., Rybin, M., Poddubny, A. et al. Fano resonances in photonics. *Nature Photon* 11, 543–554 (2017). <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.142>
6. Krushna Kanth, V., Raghavan, S. EM design and analysis of a substrate integrated waveguide based on a frequency-selective surface for millimeter wave radar application. *J Comput Electron* 18, 189–196 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10825-018-1272-z>
7. Alahnomi, R. A., Zakaria, Z., Yussof, Z. M., Althuwayb, A. A., Alhegazi, A., Alsariera, H., & Rahman, N. A. (2021). Review of Recent Microwave Planar Resonator-Based Sensors: Techniques of Complex Permittivity Extraction, Applications, Open Challenges and Future Research Directions. *Sensors*, 21(7), 2267. doi:10.3390/s21072267
8. Brookner, E. (2017). Metamaterial advances for radar and communications. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf). doi:10.1109/radar.2017.7944466
9. Elsheakh, D. (2017). Microwave Antennas for Energy Harvesting Applications. *Microwave Systems and Applications*. doi:10.5772/64918
10. Reynaud, C. A., Duché, D., Simon, J.-J., Sanchez-Adaime, E., Margeat, O., Ackermann, J., ... Escoubas, L. (2020). Rectifying antennas for energy harvesting from the microwaves to visible light: a review. *Progress in Quantum Electronics*, 100265. doi:10.1016/j.pquantelec.2020.100
11. Qinghua Lai, Almpanis, G., Fumeaux, C., Benedickter, H., & Vahldieck, R. (2008). Comparison of the Radiation Efficiency for the Dielectric Resonator Antenna and the Microstrip Antenna at Ka Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(11), 3589–3592. doi:10.1109/tap.2008.2005551
12. Guha, D., & Kumar, C. (2016). Microstrip Patch versus Dielectric Resonator Antenna Bearing All Commonly Used Feeds: An experimental study to choose the right element. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 58(1), 45–55. doi:10.1109/map.2015.2501231
13. Louisell, William H. *Coupled Mode and Parametric Electronics*. New York and London: J. Wiley and Sons, 1960.
14. W. C. Wong, K. W. Leung, K. M. Luk and E. K. N. Yung, «Circular-polarized dielectric resonator antenna excited by dual conformal strips,» *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (C, Salt Lake City, UT, USA, 2000, pp. 1021-1025 vol.2, doi: 10.1109/APS.2000.875395.*
15. Agwil, R. O., Benchikh, S., Djillali, H., & Tatu, S. O. (2020). Antenna rectifier using quadrature hybrid coupler for power-harvesting applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, e22279. doi:10.1002/mmce.22279

Shevtsov K.O., Zhivkov O.P. MICROWAVE METAMATERIAL STRUCTURES BASED ON SIW WAVEGUIDES AND RESONATORS

The article examines microwave structures based on SIW resonators and waveguides incorporating dielectric resonators located in the region of elliptical polarization of the fundamental wave type. The dielectric resonators are positioned both in through-holes of SIW structures and on their dielectric surface in specially created “windows” in the metallic walls.

The article determines that the excitation of two orthogonal oscillations shifted in phase by 90° , which are generally detuned in frequency due to the influence of surrounding metallic surfaces, in dielectric resonators leads to the formation of characteristics typical of metamaterial microwave structures. Fano resonance-type characteristics are demonstrated.

The article notes that such structures can be used as microwave sensors, antennas, and rectennas. The structure of rectennas and their main components are discussed. The article identifies one of the promising new directions for the use of microwave antennas as rectennas—receiving antennas in devices for collecting and storing microwave energy.

The article demonstrates the properties (directionality, high selectivity) of such devices, which were later applied in metamaterial cells. The study examines how excited oscillations can exhibit not only different resonance frequencies but also varying degrees of coupling with the transmission line (coupling coefficients) and different intrinsic quality factors. These characteristics are determined, for example, by varying degrees of influence from the metallic walls of the resonators.

It is shown that placing dielectric resonators in regions of elliptical polarization of these structures excites orthogonal oscillations, shifted in phase by 90° , which, under appropriate detuning of frequency and coupling levels with SIW structures, can exhibit device characteristics in the form of Fano resonance, indicating their metamaterial properties. Both experimental and theoretical characteristics of such devices, obtained based on adequate electrodynamic and mathematical models, are demonstrated.

Key words: metamaterials, SIW resonators, SIW waveguides, dielectric resonator, rectenna.

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.951.23

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/15>

Абдулін М.З.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Куник А.А.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ДОМІШОК ВОДНЮ НА РОБОТУ КОМБІНОВАНИХ СТРУМЕНЕВО-НИШЕВИХ МОДУЛІВ ПРИ СПАЛЮВАННІ ПРОПАН-БУТАНУ

У статті представлені результати дослідження впливу домішок водню (до 50%) на всі стадії робочого процесу струменево-нишевих комбінованих пальникових модулів. Основна увага приділена аналізу змін характеристик горіння, ефективності процесу та екологічних аспектів при використанні водневих паливних сумішей.

На багатьох енергетичних об'єктах передбачено використання декількох видів палива, наприклад, природного газу як основного та мазуту як резервного. Наразі максимальна ефективність вогнетехнічного об'єкта досягається при використанні основного палива, тоді як перехід на резервне або аварійне паливо супроводжується зниженням ефективності технологічних процесів. Зокрема, спостерігається погіршення стабільності горіння, зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД) на кілька відсотків, скорочення міжремонтного періоду та підвищення екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Тривають активні роботи зі створення комбінованих пальникових пристроїв, здатних з приблизно однаковою ефективністю спалювати два або більше видів палива без необхідності змінювати конструкцію при переході з одного виду палива на інший. Включення водню до складу паливних сумішей є перспективним напрямком для підвищення ефективності та екологічної безпеки процесу горіння, оскільки водень має високу реакційну здатність та сприяє покращенню характеристик паливної суміші.

У статті виконано порівняльний аналіз експериментальних даних, отриманих при спалюванні на модулях різної потужності та конфігурації чистого пропан-бутану і його сумішей з воднем різної концентрації (до 50% водню). Виявлено вплив домішок водню на низку параметрів горіння, включаючи довжину факела, рівномірність температурного поля, інтенсивність тепловиділення та загальну реакційну здатність палива.

Результати дослідження вказують на те, що введення водню у паливні суміші сприяє підвищенню ефективності процесу горіння, зменшенню утворення шкідливих викидів та поліпшенню стабільності факела. Отримані дані можуть бути використані для подальшої оптимізації конструкцій пальникових пристроїв та розробки рекомендацій щодо їх експлуатації при використанні різних типів паливних сумішей.

Ключові слова: воднева енергетика, комбіновані пальники, струменево-нишева технологія, універсальна технологія спалювання, пальники, екологічність, пропан-бутан, реакційна здатність.

Постановка проблеми. У зв'язку з енергетичною та екологічною кризою у світі стрімко зростає необхідність підвищення ефективності використання палива. З точки зору технологічних процесів, надійності та економічності, вигідно мати можливість у будь-який момент тимча-

сово перейти на інший вид палива. Вже довгий час існують пальникові пристрої, що здатні спалювати два або більше види палива (природний газ, пропан, бутан та інші низькорекційні види палива). Проте, актуальною залишається необхідність створення комбінованих пальникових при-

строїв, здатних спалювати два або більше видів палива без зміни конструктивних параметрів. Такі пальникові пристрої наразі розробляються на основі різних технологій спалювання, зокрема струменево-нишевої технології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження топкових процесів вогнетехнічних об'єктів для різних палив розглядаються в роботах таких учених, як Христич В.О., Сорока Б.С., Сігал І.Я., Абдулін М.З., Сірий О.А. та інших.

На сьогоднішній день максимальна ефективність будь-якого вогнетехнічного об'єкта досягається при використанні основного палива. При переході на використання резервного палива погіршується ефективність технологічних процесів, знижується коефіцієнт корисної дії (ККД), зменшується міжремонтний період та збільшується екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Пропан-бутан, у порівнянні з іншими резервними видами палива, має значний потенціал завдяки своїм експлуатаційним характеристикам, які близькі до природного газу. Він є більш екологічно чистим ніж рідкі та тверді види палива, як і всі газоподібні види палива, та легко піддається автоматизації процесу спалювання. Однак, порівняно з природним газом, пропан-бутан має вищу теплоту згорання і подібну низьку реакційну здатність. Його розвинена інфраструктура забезпечує доступність, швидку доставку та зручність у використанні. Крім того, ціна на пропан-бутан не прив'язана безпосередньо до цін на основні види палива, а корелює з ринком нафтопродуктів, що дозволяє закуповувати його у вигідні періоди.

Ці переваги стимулюють використання пропан-бутану разом із природним газом, якщо не як рівноцінного основного палива, то принаймні як резервного чи аварійного. Від вибору технології спалювання залежить ефективна робота пальникового приладу на обох видах палива. При розробці комбінованих пальникових пристроїв особлива увага приділяється таким експлуатаційним характеристикам:

1. Можливість роботи при мінімальних значеннях коефіцієнта надлишку повітря ($\alpha_{\min}$);
2. Повнота згорання (η_z);
3. Мінімальний аеродинамічний опір ($\Delta p_{\text{п}}$, $\Delta p_{\text{о}}$);
4. Відповідність екологічним нормативам (CO , NO_x);
5. Ефективна робота в широкому діапазоні робочих навантажень ($K_p > 6$).

Однією з найбільш ефективних технологій, що відповідає цим вимогам, є струменево-нишева технологія. Її ключовою особливістю є забезпечення рівномірного розподілу палива в потоці окиснювача та інтенсивної турбулізації потоку струменями, що створює унікальний механізм спалювання – мікродифузійне горіння. Цей процес є проміжним між дифузійним і кінетичним горінням, забезпечує високоінтенсивне та повне згорання за мінімально можливого коефіцієнта надлишку повітря.

Постановка завдання. Дослідження впливу домішок водню на ефективність, економічність і екологічну безпеку процесів горіння в комбінованих струменево-нишевих пальникових модулях для вдосконалення технологій спалювання на основі використання водневих паливних сумішей.

Метод досліджень. Метод дослідження – комп'ютерне моделювання структури течії (утворення зон зворотного току, концентраційних полів окиснювача та палива) в зоні стабілізації горіння струменево-нишевого модуля та системі модулів. Експериментальне дослідження всіх аспектів робочого процесу горіння в лабораторних умовах на експериментальному стенді зі змінними струменево-нишевыми модулями.

Об'єкт досліджень. Теплофізичні процеси в пальникових модулях та пристроях на базі струменево-нишевих систем (паливоподача, сумішоутворення, займання і т.д.).

Предмет досліджень. Характеристики всіх аспектів робочих процесів струменево-нишевого пальникового пристрою, при почерговій роботі на різних видах палива.

Виклад основного матеріалу. Струменево-нишева технологія створювалася насамперед для спалювання природного газу. Проводяться роботи з адаптації струменево-нишевого пальника для роботи на мазуті, пропан-бутані, генераторному, доменному та коксовому газах [1].

Важливою перевагою струменево-нишевої технології є надзвичайно низькі критичні значення коефіцієнтів надлишку повітря ($\alpha_{\text{кр}} = 1,02\text{--}1,03$, нижче яких з'являються викиди CO_x через недопал, у порівнянні з іншими технологіями, де $\alpha_{\text{кр}} = 1,15\text{--}1,25$).

Фізико-хімічні властивості природного газу визначають геометричні параметри пальникових модулів (див. рис. 1) на основі струменево-нишевих систем: кількість ($n_{\text{отв}}$), діаметр ($\varnothing_{\text{отв}}$) та крок ($s_{\text{отв}}$) отворів для роздачі газу, а також площу перерізу (F) повітропроводу, відстань між модулями, коефіцієнт захаращення (K_F) тощо. Крім того, ці

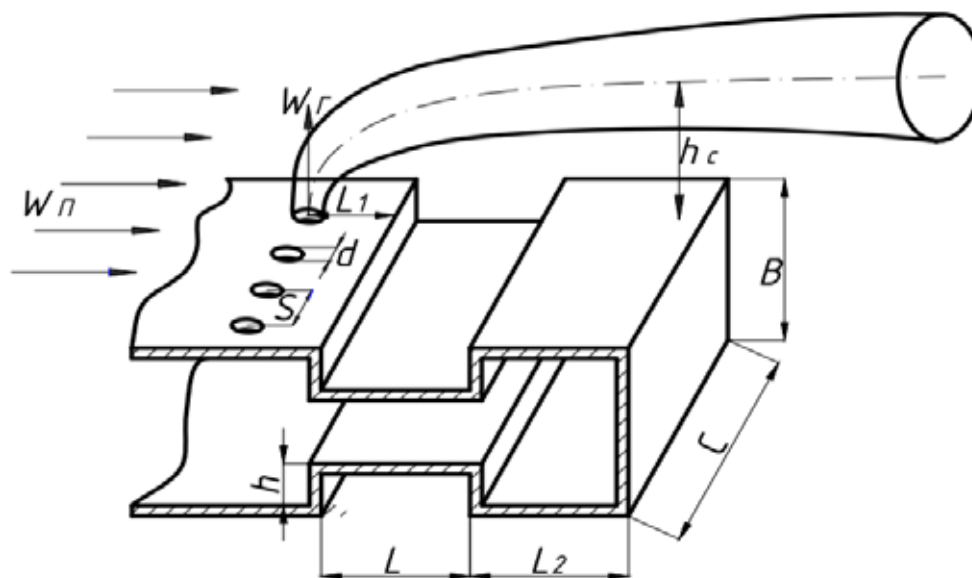


Рис. 1. Схема струменево-нишевого пальникового модуля – складової модульних пальникових приладів



а.)



б.)

Рис. 2. Спалювання пропан-бутану (а) та суміші пропан-бутану з воднем (б) на дослідному струменево-нишевому комбінованому модулі

властивості впливають на основні характеристики газорозподільної системи [2].

Аналіз літературних джерел вказує на те, що завдання спалювання різних видів палива в одному пальниковому пристрої є досить складним. Раціональним підходом є використання комбінованих пальникових пристроїв, які конструктивно та режимно налаштовані на граничні режими роботи для двох та більше видів палива, або застосування домішок водню для вирівнювання їх характеристик [3].

Потенційно перспективним рішенням є поєднання цих двох методів: попереднє зведення характеристик різних палив до схожих значень, шляхом домішування водню з наступним розра-

хунком конструктивних і режимних параметрів комбінованого пальникового пристрою.

Розпочато активну роботу над спалюванням водневих сумішей (див. рис. 2) із застосуванням струменево-нишевих пальникових модулів. Дослідження свідчать, що домішки водню здатні зближувати фізико-хімічні характеристики таких палив, як пропан-бутан і природний газ. Експериментальні дані демонструють, що струменево-нишева технологія ефективно забезпечує спалювання водневих паливних сумішей у широкому діапазоні масової концентрацій водню (до 50%) [4].

Струменево-нишеві пальникові прилади добре підходять до спалювання в них сумішей з воднем,

завдяки ефективності процесів перемішування палива та окиснювача, а також системі самоохолодження модуля, що попередньо підігрівас паливну суміш і т.д.

В рамках робіт по дослідженню комбінованих пальникових струменево-нишевих приладів, в лабораторії горіння НТУУ «КПІ» (див. рис. 3), визначалися оптимальні параметри струменево-нишевого комбінованого модуля при роботі як на природньому газі так і на пропан-бутані (та пропан-бутані з домішками водню) (див. табл. 1).

Важливою частиною експериментів є дослідження впливу домішків водню на емісію CO та NOx, довжину факелу, рівномірність температурного поля, а також реакційну здатність палива.

Порівняння проводилися на кількох варіантах струменево-нишевих комбінованих модулів, що за попередніми експериментами були визначені як найбільш ефективні для спалювання, як природного газу так і пропан-бутану. В таблиці (див. табл. 1) наводяться експериментальні дані найбільш ефективного модуля при максимальній тепловій потужності – 40кВт.

З графічного відображення результатів (див. рис. 4–5) видно, що струменево-нишеві комбіновані модулі забезпечують нижчі за нормативи викиди (при роботі на $\alpha \leq 2,5$). При цьому при додаванні водню до пропан-бутану фіксується значне зменшення викидів CO (як буде видно пізніше – через підвищення температури горіння), а викиди NOx зростають не настільки різким темпом і знаходяться в межах норми (не залежно від досліджуваного α)

Що стосується температурного поля, то як можна побачити з графіків (див. рис. 6–7) засто-

сування домішок водню, підвищує температуру факелу (та вихлопних газів) на всіх ділянках експериментального стенду. Цей ефект має більш значний на ділянках, що знаходяться ближче до модуля. Це зв'язано з тим, що домішки водню дещо скорочують довжину факелу, за рахунок швидшого вигорання палива.

Видно, що додавання домішок водню призводить до скорочення довжини факелу (див. рис. 8), це видно, по швидшому падінню рівню температури до рівня температури займання ($T_{\text{займ}} \sim 550^\circ\text{C}$). А також, по зниженню концентрації CO, що свідчить про те, що процес горіння палива вже закінчився.

Скорочення довжини факелу відбувається за рахунок кардинальної зміни структури факелу в струменево-нишевій системі. Завдяки домішкам водню розширюються межі факелу, за рахунок підпалу ділянок струменю з високою концентрацією паливної суміші, які раніше не займалися через низьку реакційну здатність пропан-бутану та природного газу (див. рис. 9).

Також помічено вплив домішок водню, на однорідність температурного поля не лише по довжині факелу, але й в поперечному розрізі. Що видно з графіку (див. рис. 10).

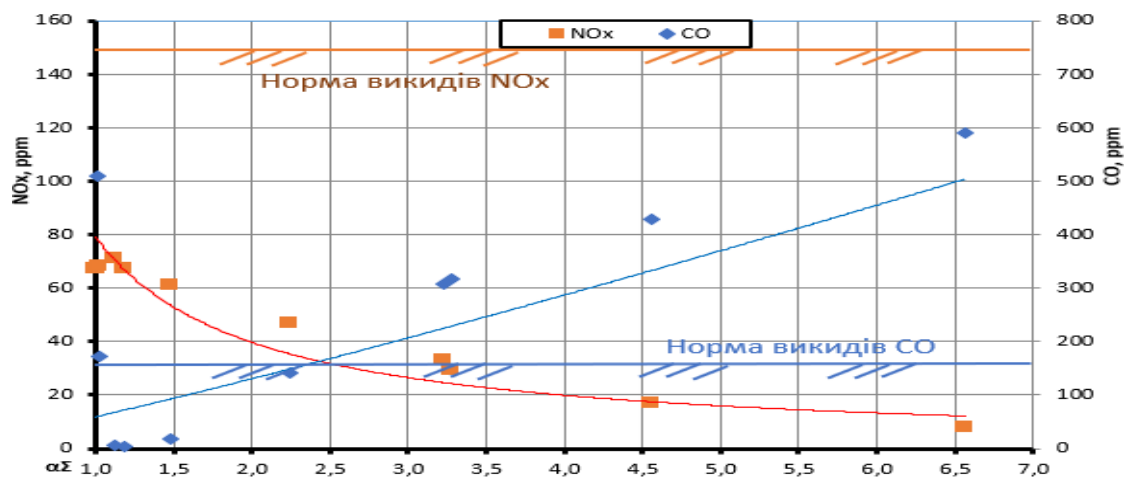
Висновки. Застосування домішок водню, є перспективним підходом до спалювання палив, особливо у випадку комбінованих пальникових приладів. За допомогою домішків водню, можна зменшувати теплотворну здатність більш висококалорійного палива, до рівня менш калорійного, зменшуючи при цьому коефіцієнт Воббе.



Рис. 3. Експериментальний стенд в лабораторії горіння НТУУ «КПІ»

Результати експериментальних досліджень струменево-нишевого модуля при роботі на пропан-бутані. Потужність модуля: 40 кВт

час		18:39	18:44	18:46	18:55	18:57	19:00	19:02	19:03	19:04	19:04
$t_{\text{проп}}$	°C	20	20,6	19,7	19,9	20,5	20,2	20,2	20,5	19,2	19,5
t_{air}	°C	20	20,2	20,2	20,6	20	20,2	20,2	20	20,5	20,2
t_{out}	°C	413	400	477	442	533	610	623	633	632	646
$t_{x=900}$	°C	452	433	515	497	593	690	723	735	745	755
$t_{x=700}$	°C	606	580	697	672	784	875	893	903	905	901
$t_{x=500}$	°C	857	812	949	690	1023	981	992	971	960	947
$t_{x=300}$	°C	1045	1000	1104	1096	1160	1147	1120	1106	1105	1086
$\Delta h_{\text{повітря}}$	мм	13	9	4	3	2	1,5	1,25	1,1	1	0,75
$h_{\text{повітря}}$	мм	50	40	30	20	10	10	10	9	8	7
$\Delta h_{\text{пропан}}$	мм	163	170	160	160	163	170	167	165	165	165
$h_{\text{пропан}}$	мм	240	260	250	235	235	245	240	240	240	240
Nox	ppm	8	17	33	29	47	61	67	71	67	67
CO	ppm	590	428	307	316	142	17	4	5	509	1212
O ₂	%	17,8	16,4	14,4	14,6	11,7	6,8	3,3	2,2	0,9	0,2
CO ₂	%	2	2,9	4,1	4,1	6	9,1	11,4	12,1	13,3	13,5
α		6,56	4,56	3,23	3,28	2,25	1,48	1,18	1,12	1,01	1
$\rho_{\text{проп}}$		2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,12	2,11
$\rho_{\text{повітря}}$		1,199	1,197	1,195	1,193	1,194	1,193	1,193	1,194	1,192	1,193
W_{air}		6,52	5,43	3,62	3,14	2,56	2,22	2,03	1,90	1,81	1,57
$\Delta W_{\text{air} \rightarrow \text{га}}$	%	5,69	19,40	18,30	2,50	17,01	35,95	44,20	44,32	45,45	39,13
α		6,96	5,66	3,89	3,37	2,72	2,31	2,13	2,01	1,92	1,66
$\Delta \alpha$	%	6,03	24,07	22,40	2,56	20,50	56,13	79,20	79,59	83,32	64,28
N, кВт		19,54	19,95	19,34	19,36	19,56	19,95	19,78	19,67	19,63	19,64
W _{гс}		3,95	4,03	3,91	3,91	3,95	4,03	4,00	3,98	3,97	3,97
q		0,73	1,50	3,09	2,89	6,09	14,22	22,09	24,91	28,54	30,56

Рис. 4. Рівень викидів (NOx та CO₂) при спалюванні пропан-бутану на струменево-нишевому пальниковому модулі потужністю 40 кВт

Не залежно від того, чи пальниковий прилад є комбінованим, чи розрахований на один вид палива, застосування домішок водню призводить до:

1. Значне зниження викидів CO;
2. Скорочення довжини факелу (до 5%);

3. Підвищення реакційної здатності низькорекційних видів палива (більшість вуглеводнів).

4. Підвищення рівномірності температурного поля, як по довжині факелу так і в поперечному сеченні.

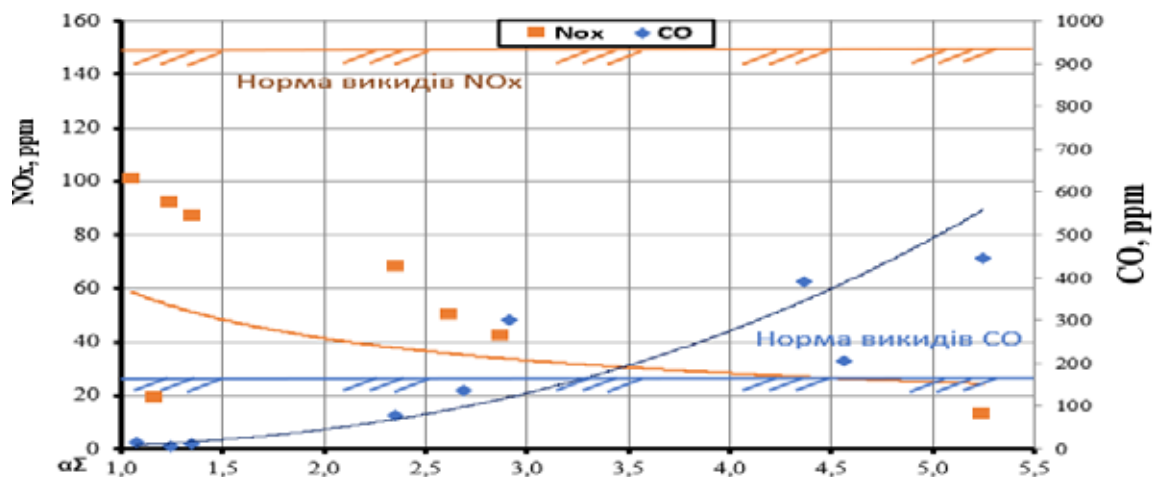


Рис. 5. Рівень викидів (NO_x та CO_2) при спалюванні пропан-бутану з домішками водню на струменево-нишевому пальниковому модулі

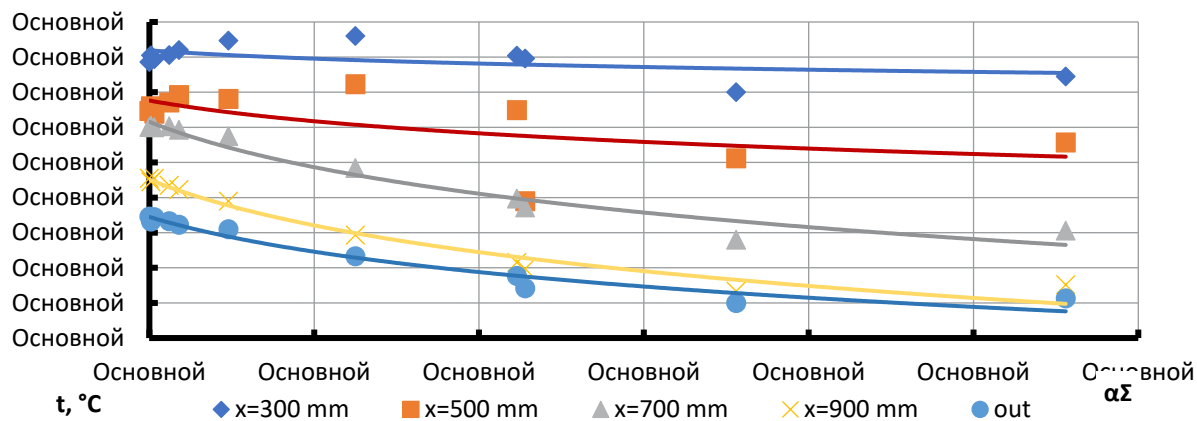


Рис. 6. Температура в різних участках робочої ділянки лабораторного стенду при спалюванні пропан-бутану

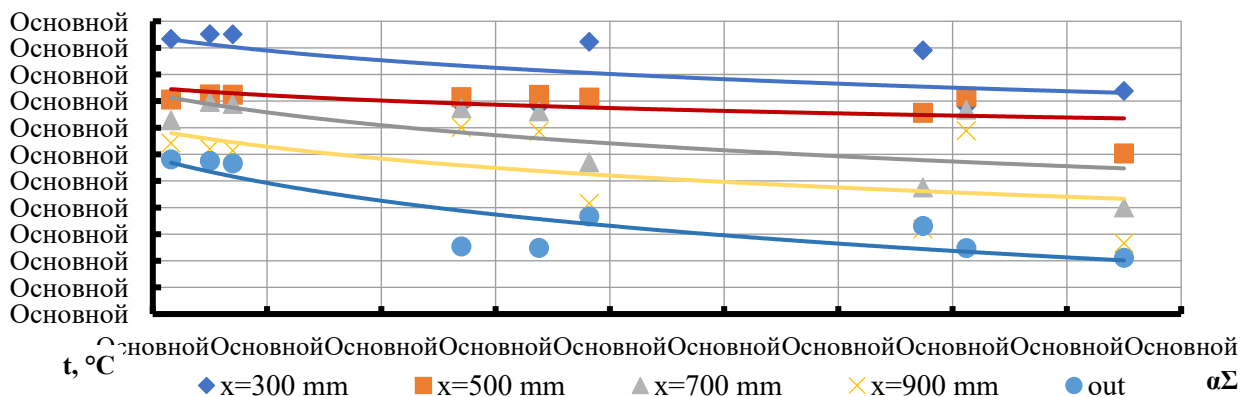


Рис. 7. Температура в різних участках робочої ділянки лабораторного стенду при спалюванні суміші пропан-бутану та водню

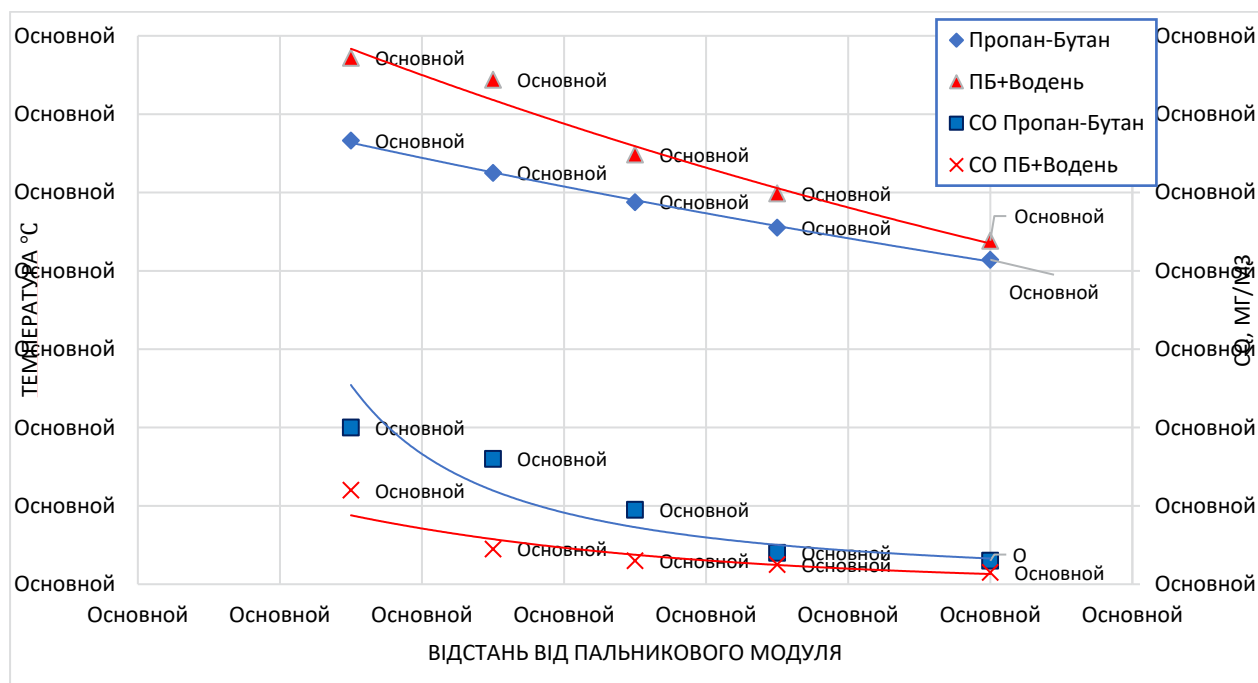


Рис. 8. Довжина факелу струменево-нишевого комбінованого пальникового модуля при роботі на пропан-бутані та його суміші з воднем

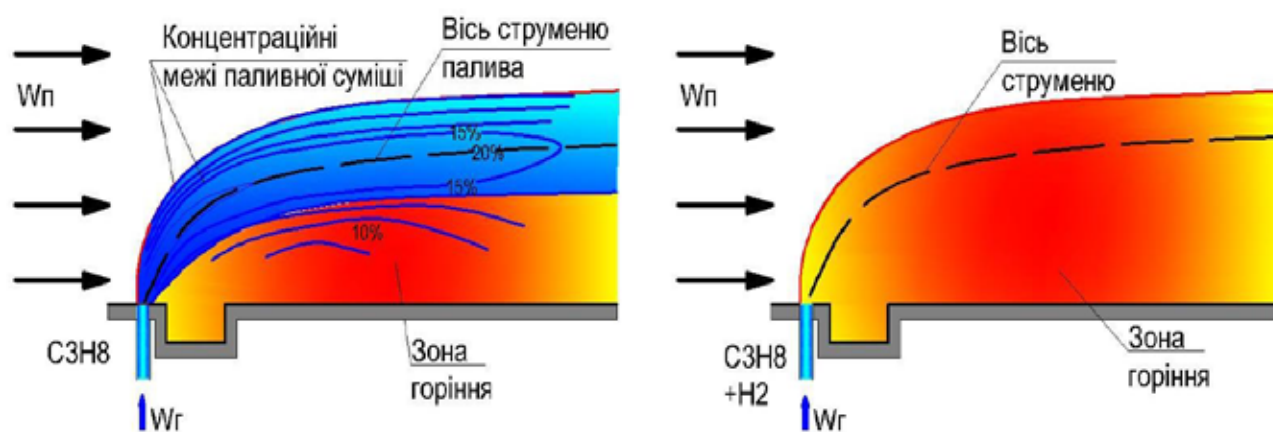


Рис. 9. Вплив домішок водню на структуру факелу

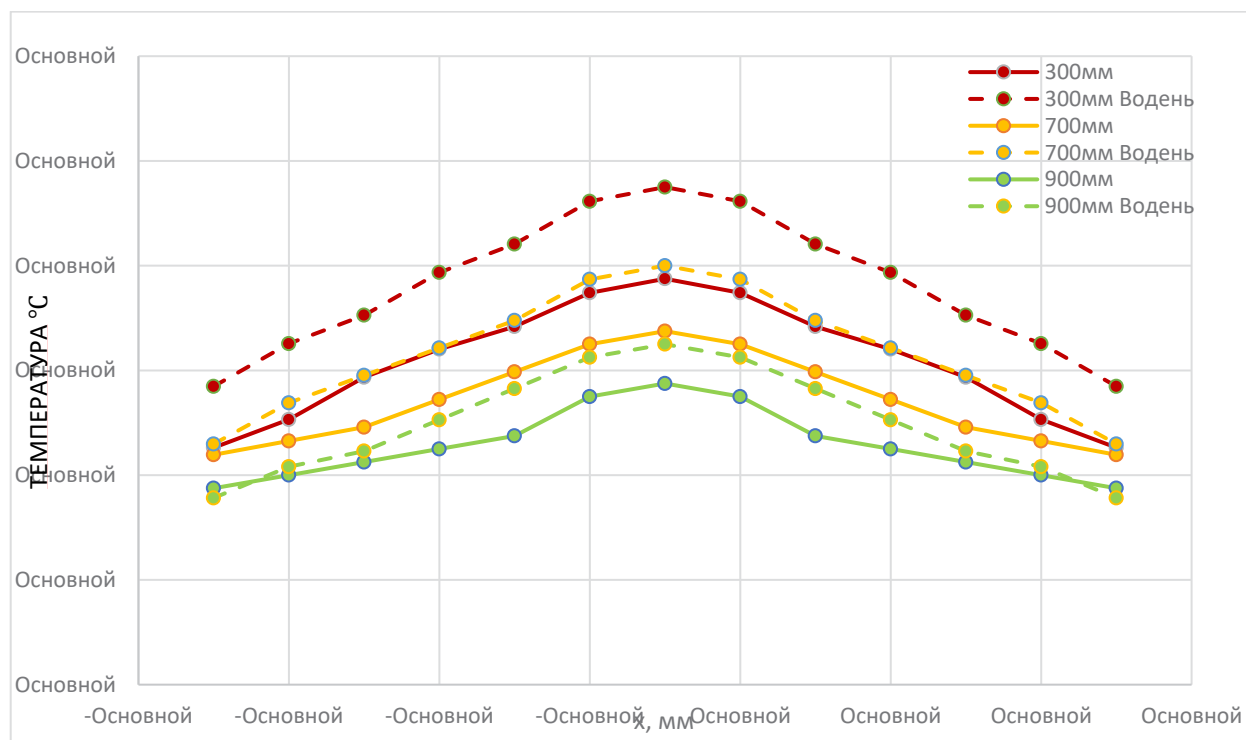


Рис. 10. Вплив домішок водню на температурне поле в поперечному січені робочої ділянки лабораторного стенду

Список літератури:

1. Куник А.А., Абдулін М.З. Шляхи створення універсальних та комбінованих пальникових приладів. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 34 (73) № 5 2023 стр. 289-294 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/44>
2. Фіалко Н. М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Полозенко Н.П., Стрижеус С.М., Єніна А.О., Тимошенко О.Б. Математичне моделювання процесів сумішоутворення в пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я Мат. XXIII міжн. конф. «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики», Київ, 2013. – с. 149-152.
3. Абдулін М.З., Куник А.А., Сірій О.А. Підвищення реакційної здатності природного газу та пропан-бутану. Збірник праць: "Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики" Київ, 2023 р.
4. Сірій О.А., Кобилянська О.О., Шляхи покращення сталості горіння в стабілізаторних елементах прямооточних пальникових систем, Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні Науки, том 34 (73) № 5 2023 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/47>
5. Абдулін М.З. Тепловий режим елементів мікродифузійного газогорілочного пристрою. М.З. Абдулін, Ібрагім Джамал. Наукові вісті НТТУ «КПІ», серія теплоенергетика. – 1997. – С. 111-113.

Abdulin M.Z., Kunyk A.A. INFLUENCE OF HYDROGEN ADMIXTURES ON THE OPERATION OF COMBINED JET-NICHE MODULES DURING PROPANE-BUTANE COMBUSTION

The article presents the results of a study on the impact of hydrogen additives (up to 50%) on all stages of the working process of jet-slot combined burner modules. The primary focus is on analyzing changes in combustion characteristics, process efficiency, and environmental aspects when using hydrogen fuel mixtures.

Many energy facilities are designed to use multiple types of fuel, such as natural gas as the primary fuel and fuel oil as a backup. Currently, maximum efficiency at a fire-technical facility is achieved when using the primary fuel, whereas switching to backup or emergency fuel leads to a decline in technological process efficiency. Specifically, there is a deterioration in combustion stability, a decrease in thermal efficiency (by several percentage points), a reduction in the inter-maintenance period, and an increase in environmental impact.

Active research is ongoing to develop combined burner devices capable of burning two or more types of fuel with approximately the same efficiency without requiring structural modifications when switching between fuel

types. Incorporating hydrogen into fuel mixtures is a promising approach to improving combustion efficiency and environmental safety, as hydrogen has high reactivity and enhances the characteristics of the fuel mixture.

The article provides a comparative analysis of experimental data obtained from combustion in modules of different power levels and configurations using pure propane-butane and its mixtures with hydrogen at varying concentrations (up to 50% hydrogen). The study identifies the effects of hydrogen additives on several combustion parameters, including flame length, temperature field uniformity, heat release intensity, and overall fuel reactivity.

The research results indicate that adding hydrogen to fuel mixtures enhances combustion efficiency, reduces harmful emissions, and improves flame stability. The obtained data can be used for further optimization of burner device designs and the development of operational recommendations for different types of fuel mixtures.

Key words: hydrogen energy, combined burners, jet-niche technology, universal combustion technology, burners, environmental friendliness, liquified petroleum gas, reactivity.

Боженко М.Ф.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИКА ВИБОРУ ПОВЕРХНЕВИХ УТИЛІЗАТОРІВ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ В КОТЕЛЬНЯХ

Зменшення температури відхідних димових газів за котлами, що встановлені в газових котельнях та ТЕЦ дозволяє підвищити ККД котлів, а також корисно використати потоки теплоти охолоджених димових газів в теплоутилізаційних установках для нагрівання мережної води або власних потреб джерела теплопостачання. Теплоутилізаційні установки (ТУ) можуть бути контактними, поверхневими, або контактнo-поверхневими. Кінцева температура охолоджених димових газів в ТУ обумовлює режими їх експлуатації, які можуть бути «сухими» (від димових газів відводяться тільки потоки «явної» теплоти) або «мокрими» (відводяться потоки «явної» і «прихованої» теплоти). Стаття присвячена розробці методики вибору набірних теплоутилізаційних установок з типових поверхневих калориферів, які у порівнянні з іншими установками характеризуються найвищими показниками енергетичної ефективності. Слід зазначити, що експлуатація калориферних установок при глибокому охолодженні димових газів доцільна при наявності споживачів з низькою температурою води. Для кожного зі встановлених в котельні котлів визначаються максимально можливі потоки відведеної теплоти при охолодженні димових газів в ТУ, а за рівнянням теплового балансу – необхідне теплове навантаження споживачів, після чого обираються режими експлуатації кожної з ТУ. Вибір калориферних установок здійснюється за визначеною площею теплопередавальної поверхні з рівняння теплопередачі. Перед початком розрахунків необхідно уточнити теплові навантаження калориферних установок та параметри теплоносіїв, а також визначитися чи є необхідність встановлювати ТУ за всіма котлами. Найбільш доцільним є варіант, коли через встановлену калориферну установку пропускаються всі димові гази після котла, а температура димових газів на виході дорівнює 60 °С для «сухого» режиму. Для ТУ, що експлуатуються в «мокрому» режиму, оптимальне значення цієї температури складає 20 – 30 °С, а при визначенні коефіцієнта тепловіддачі на зовнішній поверхні оребрених трубок враховується зрошення її конденсатом водяних парів з димових газів. Розроблені методики вибору набірних теплоутилізаційних установок з типових поверхневих калориферів, кількість яких, режими експлуатації («сухий» чи «мокрый») та спосіб розміщення, будуть обумовлюватися можливими потоками теплоти відхідних димових газів котлів та необхідним тепловим навантаженням споживачів гарячої води.

Ключові слова: котельня, димові гази, температура, теплоутилізаційна установка, потоки теплоти, вода, поверхня нагріву, коефіцієнт теплопередачі.

Постановка проблеми. Відомо, що одним з напрямків підвищення енергетичної ефективності джерел теплопостачання (котельень або ТЕЦ) є зменшення температури відхідних димових газів парових та водогрійних котлів. З одного боку, це сприяє підвищенню ККД котлів, а з іншого – дозволяє використати потік теплоти охолоджених димових газів в окремо встановлених теплоутилізаційних установках для нагрівання води власних потреб джерела теплопостачання чи зовнішніх споживачів.

Згідно з дослідженнями [1, с. 40] утилізація теплоти відхідних димових газів в котельнях дозволяє, наприклад, підвищити ККД котлів на 1,9 ... 2 % і на стільки ж зекономити витрати робочого палива, зменшити витрати електроенергії

на власні потреби, зменшити викиди шкідливих речовин в довкілля тощо.

Теплоутилізаційні установки (ТУ) можуть бути контактними, поверхневими, або контактнo-поверхневими. Кінцева температура охолоджених димових газів в ТУ обумовлює режими їх експлуатації, які можуть «сухими» (від димових газів відводяться тільки потоки «явної» теплоти) або «мокрими» (відводяться потоки «явної» і «прихованої» теплоти).

В попередній публікації [2, с. 37] з посиланням на відповідні літературні джерела зазначені конструкції і методики розрахунків основних типів ТУ, які використовуються в газових котельнях, і які експлуатуються в «сухому» режимі, а також при глибокому охолодженні димових газів нижче

їх температури точки роси, зокрема, і при зволоженні дуттьового повітря. Там же підкреслений вклад у ці розробки відповідних організацій та таких провідних науковців як Аронов І. З., Семенюк Л. Г., Фіалко Н. М., Кудінов А. А. Значну увагу також приділено способам виключення конденсації водяних парів в газовому тракті і димовій трубі при глибокому охолодженні димових газів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поверхневі утилізатори-калорифери, контактні теплоутилізатори з активною насадкою (КТАНи), екологічно чисті теплоутилізаційні установки (ЕКТ) набули широкого використання для утилізації теплоти димових газів парових та водогрійних котлів на ТЕЦ і в котельнях. Це наголошено в роботі [2, с. 35] в результаті відповідного аналізу використання ТУ, що доведені до промислового виробництва. Також відомі розробки конденсаційних поверхневих теплоутилізаційних установок Інститутів технічної теплофізики НАН України та промислової екології для встановлення за котлами теплопродуктивністю до 10 МВт, а для котлів більшої теплопродуктивності – іноземні розробки на відповідну фіксовану теплопродуктивність. Важливим фактором при виборі ТУ димових газів є впровадження утилізаційних установок з набірного типового обладнання, зокрема, поверхневих калориферів, на теплопродуктивність, яка обумовлена необхідним навантаженням споживачів.

ТУ з поверхневими калориферами у порівнянні з КТАНами і ЕКТ характеризуються найвищими показниками енергетичної та екологічної ефективності [3, с. 87]. Результати розрахункових досліджень енергетичної і екологічної ефективності використання ТУ з поверхневими калориферами в водогрійних котельнях наведені в роботах [4-6]. Варіантні розрахунки передбачали експлуатацію калориферів в «сухому» і «мокрому» режимах. Для запобігання конденсації водяних парів в газовому тракті і в димовій трубі був обраний метод байпасування частини димових газів в обхід калориферів. В результаті цих розрахунків були отримані окремі залежності коефіцієнта байпасування (для «мокрого» режиму) і питомих потоків або кількості відведеної теплоти від температури охолоджених димових газів для різних температур димових газів на вході в калорифери в інтервалі 140 – 190 °С. В роботі [2, с. 36-38] отримані узагальнені залежності коефіцієнта байпасування та питомої кількості відведеної від димових газів теплоти у залежності від температури охолоджених димових газів та їх температури на вході в поверхневі утилізатори-калорифери для

зазначеного вище інтервала температур, а також різних значеннях вологовмісту, при експлуатації в «сухому» та «мокрому» режимах.

Слід зазначити, що експлуатація калориферних установок при глибокому охолодженні димових газів доцільна при наявності споживачів з низькою температурою води. В роботі [4, с. 83], наприклад, для котельні з трьома водогрійними котлами, розглянута схема каскадної утилізації. За кожним з котлів встановлені калориферні установки, що експлуатуються в «сухому» режимі, тобто температура димових газів після них становить 60 °С (перший каскад). Далі димові гази надходять на одну калориферну установку, що експлуатується у «мокрому» режимі, температура димових газів після якої буде меншою за температуру точки роси (другий каскад). Аналогічний підхід використаний і в роботі [7, с. 226], де проаналізована ефективність теплоутилізаційних систем газоспоживальних опалювальних котлів з комбінованим використанням утилізованої теплоти для нагрівання води теплової мережі та системи водочищення. В другій ТУ здійснюється нагрівання, наприклад, сирій води власних потреб котельні, при цьому димові гази охолоджуються до температури нижче температури точки роси.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методики вибору набірних теплоутилізаційних установок з типових поверхневих калориферів, кількість яких, режими експлуатації («сухий» чи «мокрый») та спосіб розміщення, будуть обумовлюватися можливими потоками теплоти відхідних димових газів котлів та необхідним тепловим навантаженням споживачів гарячої води.

Виклад основного матеріалу. Для кожного зі встановлених в котельні котлів визначаються максимально можливі потоки відведеної теплоти при охолодженні димових газів в ТУ, кВт, за формулою

$$Q_{ki} = L_{\Gamma}^c q_{k,\Gamma} = \frac{B_{ki}}{3600} G_{\Gamma}^c q_{k,\Gamma}, \quad (1)$$

де L_{Γ}^c – масова витрата сухих продуктів згоряння, кг/с; $q_{k,\Gamma}$ – питома кількість відведеної від димових газів теплоти, кДж/кг; B_{ki} – витрата природного газу на спалювання в котлі, м³/год; G_{Γ}^c – маса сухих продуктів згоряння, кг/м³.

Витрату природного газу B_{ki} , м³/год, беруть або за фактичним значенням для працюючого котла, або за технічними характеристиками котлів. Маса сухих продуктів згоряння можна взяти сталою для усередненого складу природного газу $G_{\Gamma}^c = 13,42$ кг/м³ [5, с. 52]. Величину $q_{k,\Gamma}^c$, кДж/кг,

визначають за методикою [2, с. 36] у залежності від температури (t'_r , °C) та вологовмісту (d'_r , кг/кг с.г) димових газів на виході з котла – вході в ТУ для «сухого» режиму роботи. При глибокому охолодженні димових газів («мокрый» режим) величина $q_{к.г}^m$ також визначається за методикою [2, с. 37] у залежності від t'_r та температури димових газів на виході з ТУ (t''_r , °C), оптимальне значення якої можна брати в інтервалі температур 20 – 30 °C.

Загальний можливий потік відведеної від димових газів теплоти, кВт, визначається за сумою потоків для кожного котла при двох режимах експлуатації ТУ, тобто $\Sigma Q_k = \Sigma Q_{ki}$.

Наприклад, для водогрійного котла КВ-ГМ-10 величини $B_{ki} = 1260$ м³/год та $t'_r = 185$ °C [8, с. 79], тоді при величині $d'_r = 0,13$ кг/кг с.г при спалюванні природного газу усередненого складу [5, с. 52], питома кількість відведеної від димових газів теплоти складе $q_{к.г}^c = 157$ кДж/кг для «сухого» режиму роботи ТУ та $q_{к.г}^m = 361$ кДж/кг – для «мокрого» режиму, а коефіцієнт байпасування димових газів $\theta_r = 0,25$ та $d''_r = 0,018$ кг/кг с.г (при $t''_r = 25$ °C). Потоки відведеної від димових газів теплоти в ТУ (Q_{ki} , кВт) згідно з формулою (1) складуть 737 та 1695 для «сухого» та «мокрого» режимів відповідно.

Необхідне теплове навантаження споживачів, кВт, визначається за рівнянням теплового балансу

$$\Sigma Q_v = \Sigma G_{vi} c_v (t''_{vi} - t'_{vi}), \quad (2)$$

де G_{vi} – масова витрата відповідного потоку води, що нагрівається в ТУ, кг/с; c_v – теплоємність води, кДж/(кг · К), яку можна брати для всіх потоків води сталою $c_v = 4,19$ кДж/(кг · К); t''_{vi} та t'_{vi} – температури потоків води на виході з ТУ та вході до неї відповідно, °C.

Надалі порівнюють можливі потоки відведеної від димових газів теплоти ΣQ_k з необхідним навантаженням споживачів ΣQ_v . Якщо, наприклад, визначена величина для «сухого» режиму $\Sigma Q_k \geq \Sigma Q_v$, то наступний вибір калориферних установок, які можуть бути встановлені за всіма або декількома котлами, здійснюється для «сухого» режиму їх експлуатації. У разі, якщо для цього ж режиму величина $\Sigma Q_k < \Sigma Q_v$, то в цьому випадку може бути використана комбінована схема: зворотня вода теплової мережі перед надходженням до котлів, наприклад, нагрівається в ТУ, що працюють в «сухому» режиму, а вода власних потреб котельні (сирого та хімічно підготовлена) – в ТУ, що експлуатуються в «мокрому» режиму.

Вибір калориферних установок, що експлуатуються в «сухому» режиму. Перед початком розрахунків необхідно уточнити теплові навантаження калориферних установок та параметри теплоносіїв, а також визначитися чи є необхідність встановлювати ТУ за всіма котлами. Найбільш доцільним є варіант, коли через встановлену калориферну установку пропускаються всі димові гази масовою витратою L_r^c . Якщо калориферна установка за окремим котлом завантажена повністю, то її теплове навантаження Q_{ki} дорівнює визначеній величині за формулою (1), а температура димових газів на виході $t'_r = 60$ °C. При неповному завантаженні калориферної установки її теплопродуктивність Q_{ki}^d визначається за необхідним навантаженням для нагріву відповідного потоку води за рівнянням вигляду (2), а дійсна температура димових газів на виході, °C, при сталому значенні вологовмісту димових газів $d'_r = 0,13$ кг/кг с.г, визначається за формулою

$$t''_{rd} = t'_r - \frac{Q_k^d}{1,256 L_r^c}.$$

Вибір ТУ здійснюють за методикою [9, с. 10-15] при використанні калориферів зі спіральним оребренням моделей КСк 3 та КСк 4. Спочатку беруть масову швидкість димових газів $(\rho v)_r$ в інтервалі 1,5 – 7 кг/(с·м²) (практичні значення в інтервалі 3,5 – 5 кг/(с·м²)) і за рівнянням суцільності визначають орієнтовну площу фронтального перерізу для проходження димових газів f_{op} , м². Надалі за таблицями технічних характеристик [10, с. 371] обирають один або декілька калориферів з дійсною площею фронтального перерізу f_ϕ , яка наближена до визначеної f_{op} . Калорифери в установці повинні бути однієї моделі та номеру, а їхня кількість – по можливості мінімальна. Для вибраного калорифера занотовують значення величини дійсної площі поверхні нагріву F_d , м²; f_ϕ , м²; площу живого перерізу за напрямком руху води f_w , м² тощо. Після уточнення швидкості димових газів $(\rho v)_r^0$ за відомим співвідношенням [9, с. 13] визначають швидкість руху води в трубах калорифера ω_b , м/с, а потім коефіцієнт теплопередачі від димових газів до води, Вт/(м²·К), за формулою [10, с. 373]

$$K = A (\rho v)_r^n \omega_b^r,$$

де A , n і r – постійні коефіцієнти, значення яких у залежності від моделі калорифера наведені в [10, с. 373].

Середній температурний напір Δt_{cp} , °C, визначають для перехресної схеми руху теплоносіїв, а необхідну поверхню нагрівання калориферної

установки $F_{\text{т}}, \text{м}^2$ – за відомим рівнянням теплопередачі [9, с. 14]. Також за [9, с. 14] визначають запас дійсної поверхні нагрівання калориферної установки по відношенню до теоретично необхідної $\delta F_{\text{д}}, \%$, величина якого повинна бути в межах 10 – 20%. За відомими залежностями також визначають аеродинамічний та гідравлічний опори калориферних установок.

Форма представлення вихідних даних та вибору ТУ наведена в табл. 1, де також є приклад розрахунків встановлення калориферів за водогрійними котлами КВ-ГМ-6,5 промислово-опалювальної пароводогрійної котельні, що використовуються для нагрівання води власних потреб [11, с. 211].

Вибір калориферних установок, що експлуатуються в «мокрому» режиму. Спочатку уточнюються теплові навантаження ТУ. Якщо калориферна установка за будь-яким котлом налаштовується на експлуатацію в «мокрому» режиму при охолодженні димових газів від $t'_\text{г}$ до $t''_\text{г} < t_\text{р}$, то її теплопродуктивність визначається за формулою (1) з урахуванням питомої кількості відведеної від димових газів теплоти $q_{\text{к.г}}^{\text{м}}$. При використанні в котельні комбінованої (каскадної) ТУ в першому контурі димові гази охолоджуються від $t'_\text{г}$ до $t''_\text{г} = 60^\circ \text{C}$ («сухий» режим), а в другому – від $t'_\text{г} = 60^\circ \text{C}$ до $t''_\text{г} < t_\text{р}$ («мокрый» режим). Теплопродук-

тивність ТУ кожного контура також визначається за формулою (1), причому для першого контура величина $q_{\text{к.г.І}}^{\text{с}} = q_{\text{к.г}}^{\text{с}} (1 - \theta_\text{г})$, а для другого $q_{\text{к.г.ІІ}}^{\text{м}} = q_{\text{к.г}}^{\text{м}}$.

Вибір типу та кількості калориферів в ТУ здійснюється за аналогією з наведеною вище методикою для роботи калориферів в «сухому» режиму з відмінністю в визначенні коефіцієнта теплопередачі. Така методика була використана в роботі [3, с. 85] з посиланням на відповідне першоджерело.

Нехтуючи термічними опорами теплопровідності сталевих та алюмінієвих трубок калориферів типу КСк, коефіцієнт теплопередачі від димових газів до води при віднесенні теплового потоку до оребреної поверхні, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, визначається за відомою формулою [10, с. 216]

$$K_{\text{ор}} = \frac{1}{(1/\alpha_{\text{вн}})\phi + (1/\alpha_3)}, \quad (3)$$

де $\alpha_{\text{вн}}$ і α_3 – коефіцієнти тепловіддачі на внутрішніх та зовнішніх поверхнях калорифера, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, відповідно; ϕ – коефіцієнт оребрення зовнішніх поверхонь трубок калориферів, величина якого складає 16,48.

Коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні трубок, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, визначається за [9, с. 51], а з урахуванням сталого внутрішнього

Таблиця 1

Приклад вибору калориферних установок

Показник для кожної установки	Калориферні установки	
	T1 і T2 за ВК1 і ВК2 для нагріву сирої води	T3 і T4 за ВК3 і ВК4 для нагріву хім. підгот. води
$Q_{\text{к}}, \text{кВт}$	211,6	372,6
$L_{\text{г}}^{\text{с}}, \text{кг/с}$	3,19	3,19
$t'_\text{г}, ^\circ\text{C}$	153	153
$t''_\text{г}, ^\circ\text{C}$	81,5	60
$G_{\text{вг}}, \text{кг/с}$	2,525	2,107
$t'_\text{в}, ^\circ\text{C}$	5	25
$t''_\text{в}, ^\circ\text{C}$	25	67,2
$(\rho v)_\text{г}^{\text{д}}, \text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$	3,2	3,2
$\omega_\text{в}$	1	0,63
$K, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	48,7	42,13
$\Delta t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	102,2	55
Модель, номер	КСк3-7	КСк4-7
Кількість калориферів, спосіб під'єднання	$n_{\text{заг}} = 3; N = 3; n_{\text{к}} = 3;$ $n_{\text{г}} = 1; n_{\text{в}} = 1$	$n_{\text{заг}} = 9; N = 3; n_{\text{к}} = 3;$ $n_{\text{г}} = 3; n_{\text{в}} = 3$
$F_{\text{т}}, \text{м}^2$	42,5	160,8
$F_{\text{д}}, \text{м}^2$	49,02	193,23
$\delta F_{\text{д}}, \%$	13,3	16,8

Примітки: $n_{\text{заг}}$ – загальна кількість калориферів; N – кількість паралельних у фронтальному перетині; $n_{\text{к}}$ – кількість паралельних за напрямком руху води; $n_{\text{г}}$ і $n_{\text{в}}$ – кількість послідовних за напрямком руху димових газів і води відповідно.

діаметра трубок $d_{\text{вн}} = 13$ мм формула має наступний вигляд

$$\alpha_{\text{вн}} = (3353,6 + 49,89\bar{t}_b - 0,105\bar{t}_b^2) \omega_b^{0,8}, \quad (4)$$

де $\bar{t}_b$ – середня температура води, що нагрівається, °С.

При визначенні коефіцієнта тепловіддачі на зовнішній поверхні оребрених трубок α_3 , Вт/(м²·К), слід врахувати зрошення її конденсатом водяних парів з димових газів. Згідно з методикою, що була застосована в роботі [3, с. 85] з посиленням на відповідне джерело, α_3 обчислюється за запропонованим Кудіновим А. А. безрозмірним рівнянням вигляду

$$\text{Nu}_r = 4,55 \text{Re}_r^{0,315} K_{\text{зр}}^{0,388} \text{Pr}_r^{2/3}, \quad (5)$$

де Nu_r – число Нуссельта; Re_r – число Рейнольдса; $K_{\text{зр}}$ – критерій зрошення; Pr_r – критерій Прандтля.

$$\text{Nu}_r = \frac{\alpha_3 d_{32}}{\lambda_r}; \text{Re}_r = \frac{v_r d_{32}}{\nu_r}; K_{\text{зр}} = \frac{W d_{32}}{\mu_r},$$

де d_{32} – зовнішній діаметр алюмінієвих трубок, м, який дорівнює 0,018 м; v_r – швидкість димових газів в живому перерізу калорифера, м/с; W – густина зрошення зовнішньої поверхні, кг/(м²·с); λ_r , ν_r , μ_r – відповідно теплопровідність [Вт/(м·К)], кінематична [м²/с] і динамічна [кг/(м·с)] в'язкість димових газів.

Швидкість димових газів, м/с

$$v_r = \frac{L_c (1 - \theta_r)}{\rho_r f_{\text{ж}} N}, \quad (6)$$

де ρ_r – середня густина димових газів в калориферній установці, кг/м³; $f_{\text{ж}}$ – площа живого перерізу для проходження димових газів, м² (табл. 2).

Густина зрошення зовнішньої поверхні трубок калорифера, кг/(м²·с)

$$W = \frac{L_c (1 - \theta_r) (d'_r - d''_r)}{F_d}. \quad (7)$$

Для перевірки представленої вище методики вибору ТУ при глибокому охолодженні димових газів («мокрый» режим) виконані практичні розрахунки встановлення калориферних установок за одним з котлів КВ-ГМ-6,5 для нагрівання сирой

води загальною витратою 5,05 кг/с (див. вихідні дані для установки Т1 в табл. 1) від 5 до 50 °С. Димові газы охолоджуються від 153 до 25 °С; вологовміст зменшується від 0,13 до 0,018 кг/кг с.г; коефіцієнт байпасування $\theta_r = 0,32$ [2, с. 37]. Питома кількість відведеної від димових газів теплоти складає $q_{\text{к.г}}^{\text{м}} = 303,4$ кДж/кг, а теплове навантаження калориферної установки згідно з формулою (1) $Q_{\text{к}} = 967,8$ кВт. В ТУ обрали 4 калорифери КСк 3-6 сумарною дійсною площею теплопередавальної поверхні $F_d = 55,2$ м²; всі калорифери розміщені паралельно за напрямком руху димових газів і води; дійсна масова швидкість димових газів у фронтальному перерізі $(\rho v)_d^0 = 2,07$ кг/(с·м²); швидкість руху води у в трубках калорифера $\omega_b = 1,09$ м/с.

За середньою температурою димових газів в калориферній установці $t_r = 89$ °С визначили їх фізичні властивості: $\lambda_r = 0,03036$ Вт/(м·К), $\nu_r = 20,51 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\mu_r = 20,26 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с), $\rho_r = 0,988$ кг/м³, $\text{Pr}_r = 0,693$. За формулою (6) визначили $v_r = 5$ м/с; за формулою (7) $W = 0,0044$ кг/(м²·с); за відповідними співвідношеннями $\text{Re}_r = 4390$, $K_{\text{зр}} = 3,9$; а за формулою (5) $\text{Nu}_r = 84,8$, після чого коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні $\alpha_3 = 143$ Вт/(м²·К). За формулою (4) при середній температурі води, що нагрівається, $t_b = 27,5$ °С, та її швидкості, визначили коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні $\alpha_{\text{вн}} = 4971,4$ Вт/(м²·К), а за формулою (3) коефіцієнт теплопередачі $K_{\text{оп}} = 97,1$ Вт/(м²·К). За відомою залежністю для перехресної схеми руху теплоносіїв визначили середній температурний напір в калориферній установці $\Delta t_{\text{ср}} = 49,12$ °С, а за рівнянням теплопередачі необхідну площу теплопередавальної поверхні $F_r = 202,9$ м². Оскільки $F_d < F_r$, то до групи з чотирьох калориферів типу КСк 3-6 послідовно встановлюємо ще три групи аналогічних калориферів, тоді $\Sigma F_d = 220,8$ м², а запас дійсної поверхні нагріву по відношенню до необхідної складатиме біля 8%, що близько до рекомендованого значення цієї величини. За відповідними формулами [10, с. 373] визначаються аеродинамічний $\Delta P_a = 95,2$ Па та гідравлічний $\Delta P_r = 48,7$ кПа опори калориферної установки.

Висновки. 1) В роботі наведені методики вибору набірних теплоутилізаційних установок

Таблиця 2

Площа живого перерізу зі сторони димових газів калориферів КСк

Модель, номер	КСк3-6	КСк3-7	КСк3-8	КСк3-9	КСк3-10	КСк3-11	КСк3-12
	КСк4-6	КСк4-7	КСк4-8	КСк4-9	КСк4-10	КСк4-11	КСк4-12
$f_{\text{ж}}, \text{м}^2$	0,111	0,137	0,163	0,189	0,240	0,685	1,027

з типових поверхневих калориферів, кількість яких, режими експлуатації («сухий» чи «мокрый») та спосіб розміщення, обумовлюються можливими потоками теплоти відхідних димових газів котлів та необхідним тепловим навантаженням споживачів гарячої води.

2) В результаті числових розрахунків отримані рівняння для визначення максимально можливих потоків відведеної теплоти при охолодженні димових газів в ТУ, а також наведені методики вибору типу та кількості калорифер-

них установок для «сухого» та «мокрого» режимів їх роботи.

3) Наведені форми представлення вихідних даних та вибору калориферних установок, а також приклади їх вибору для окремих котлів, що можуть бути встановлені в газових котельнях.

4) Напрямком подальших досліджень може бути розробка методики вибору основного обладнання та технологічних регламентів експлуатації теплоутилізаційних установок при глибокому охолодженні димових газів та зволоженні дуттьового повітря.

Список літератури:

1. Чепурний М. М., Димнич І. М., Куцак О. В. Енергетична ефективність утилізації теплоти відхідних димових газів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 3. 2011. С. 37 – 40.
2. Боженко М. Ф., Камишний Б. М. Методика визначення енергетичної ефективності утилізації теплоти димових газів котельень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т 35 (74). № 1 (2). 2024. С. 34-39. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/06>.
3. Боженко М. Ф., Озеруга О. В. Порівняльні характеристики утилізаційних установок димових газів котельень зі зволоженням дуттьового повітря. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1. 2020. С. 79-89. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2020.217572>.
4. Боженко М. Ф., Перевьорткіна І. Я. Каскадна утилізація теплоти димових газів опалювальних водогрійних котельень. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1 (43). 2016. С. 81 – 88.
5. Боженко М. Ф., Перевьорткіна І. Я. Підвищення ефективності утилізаторів теплоти димових газів котельень за рахунок зволоження дуттьового повітря. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1 (47). 2017. С. 51 – 57.
6. Боженко М. Ф., Озеруга О. В. Підвищення енергетичної та екологічної ефективності поверхневих теплоутилізаторів димових газів водогрійних котельень. *KPI Science News*. № 1. 2020. С. 7 – 14. DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.1.197948.
7. Навродська Р. О. Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для котельних установок комунальної енергетики. *Науковий вісник НЛТУ України*. Т. 25. № 9. 2015. С. 225–229.
8. Алабовський О. М., Боженко М. Ф., Хоренченко Ю. В. Проектування котельень промислових підприємств: Курсове проектування з елементами САПР: Навч. посібник для студентів вузів із спец. «Промислова теплотехніка». К.: Вища школа. 1992. 207 с.
9. Боженко М. Ф., Сало В. П. Енергозбереження в теплопостачанні : навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ». 2008. 268 с.
10. Боженко М. Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання повітря будівель [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика». К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019. 380 с.
11. Стеценко О. М., Боженко М. Ф. Підвищення енергетичної ефективності котельень в системах централізованого теплопостачання. Матеріали XX Міжнародної науково – практичної конференції молодих вчених і студентів. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. 25-28 квітня 2023 р. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. Т 1. С. 210-211.

Bozhenko M.F. METHODOLOGY FOR SELECTING SURFACE FLUE GAS HEAT RECOVERY UNITS IN BOILER HOUSES

Reducing the temperature of exhaust flue gas behind boilers installed in gas-fired boiler houses and thermal power plants increases boiler efficiency and enables the effective use of heat flows from cooled flue gas in heat recovery units for mains water heating or own needs the heat supply source. Heat recovery units (HRU) can be contact, surface, or contact-surface. The final temperature of cooled flue gas in HRUs determines their operating modes, which can be "dry" (only "sensible" heat is removed) or "wet" (both "sensible" and "latent" heat are removed). The article deals with development of the methodology for selecting modular heat recovery units from standard surface heaters, which, compared to other systems, exhibit the highest energy efficiency indicators. It should be noted that operating heaters with deep cooling of flue gas is advisable if there are consumers with low water temperature. The maximum possible flows of removed heat during flue gas cooling in HRU are determined for each of the boilers installed in the boiler house, and the required heat load

for consumers is calculated using heat balance equation, after which the operating modes of each HRU are selected. The selection of heating units is carried out based on the calculated heat transfer area from the heat transfer equation. Before starting the calculations, it is necessary to refine the heat loads of the heater units and the parameters of the coolants, and determine the necessity of installing HRUs behind all boilers. The most efficient option involves passing all flue gas after the boiler through the installed heater unit, ensuring the flue gas outlet temperature is 60 °C for the "dry" mode. For HRUs operating in the "wet" mode, the optimal flue gas outlet temperature is 20-30 °C, and when determining the heat transfer coefficient on the outer surface of finned tubes, the effect of condensation from water vapor in the flue gas is taken into account. There were developed methodologies for selecting modular heat recovery units from typical surface heaters, the number of which, operating modes ("dry" or "wet") and the ways of placement will depend on potential heat flows boilers' exhaust flue gas and required heat load for hot water consumers.

Key words: boiler house, flue gas, temperature, heat recovery unit, heat flows, water, heating surface, heat transfer coefficient.

Бошков Л.З.

Одеський національний технологічний університет

Волгушева Н.В.

Одеський національний технологічний університет

Гречановський А.П.

Одеський національний технологічний університет

Гаранін Є.В.

Одеський національний технологічний університет

КОЕФІЦІЄНТИ ДИФУЗІЇ ТА ТЕРМОДИФУЗІЇ ВОЛОГИ В ЩІЛЬНОМУ ШАРІ ЦЕОЛІТУ 13X

Робота присвячена визначенню коефіцієнтів перенесення теплоти та вологи у цеоліту 13X в вигляді щільного шару дисперсного матеріалу. Наголошується, що особливо важливим є доступність точних значень або надійних виразів для коефіцієнтів дифузії вологи в досліджуваних матеріалах. Відзначено, що оцінка феноменологічних параметрів, які включені в рівняння масо- та теплопередачі, є загальною проблемою інженерних задач в галузі теплоенергетики, вирішення якої необхідно для моделювання, проектування та оптимізації процесів сушіння. Доведено на підставі аналітичного огляду наукової літератури, що при аналізі зміни коефіцієнта дифузії слід враховувати пористість матеріалу внаслідок того, що розмір пор впливає на визначальний механізм дифузії вологи та відображається в значенні коефіцієнта дифузії (кнудсенівська дифузія, молекулярна дифузія). Проаналізовано залежність коефіцієнта дифузії вологи від вологовмісту, температури, розміру пор і визначального розміру частинок для різних дисперсних матеріалів. Наведено розрахункові формули для визначення коефіцієнтів дифузії вологи, відносного коефіцієнта термодифузії і вологопровідності, а також методика обробки експериментальних даних. Представлено зміну коефіцієнтів дифузії та термодифузії вологи для цеоліту 13X залежно від температури та вологовмісту в процесах кондуктивного та конвективного сушіння, що отримано на підставі експериментальних досліджень. Представлено залежність коефіцієнту дифузії вологи від температури при кондуктивному сушінні цеоліту 13X в графічному вигляді. Доведено, що коефіцієнт дифузії вологи практично не залежить від способу теплопідведення за умови, що температури незначно відрізняються. Показано, що у дослідженому діапазоні зміни параметрів відносний коефіцієнт термодифузії вологи залежить тільки від вологовмісту і температури. Визначено, що закономірності змін коефіцієнтів перенесення залежно від температури та вологовмісту для цеоліту 13X аналогічні літературним даним.

Ключові слова: сушіння, кондуктивне, конвективне, вологовміст, температура, дисперсний матеріал, експеримент.

Постановка проблеми. Оцінка феноменологічних параметрів, які з'являються в рівняннях масо- та теплопередачі та виразах швидкості на основі експериментальних даних, є загальною проблемою інженерних задач в галузі теплоенергетики [1]. Зокрема, для моделювання, імітації, проектування та оптимізації процесів сушіння особливо важливо, щоб були доступні точні значення або надійні вирази для коефіцієнтів дифузії вологи в досліджуваних твердих речовинах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежність коефіцієнта дифузії від вологи можна ввести, розглядаючи фактор Арреніуса або енер-

гію активації як функції вологовмісту [2]. Цей метод базується на узагальнених рішеннях задач масообміну і застосований для визначення коефіцієнтів дифузії вологи при сушінні.

Процеси масообміну зазвичай описуються рівняннями дифузії, феноменологічним параметром у цьому рівнянні є коефіцієнт масової дифузії [3].

У роботі [4, 5, 6] для дослідження було обрано ряд широко застосовуваних у промисловості дисперсних матеріалів. Це – абразивні шліф- та мікропорошки карбіду кремнію, карбіду бору, електрокорунд, зварювальні флюси, активоване вугілля, флюорит.

Похибка визначення коефіцієнтів перенесення залежить від вмісту води і температури зразка і становить 9-17% при визначенні a_m 2-4% при визначенні δ . Максимальні похибки відносяться до областей середньінтегральних температурах вище 70 °С і вологовмістах нижче 0,06 кг/кг [6]. Найбільший внесок у сумарну похибку вносять похибки визначення середньінтегрального вмісту води, швидкості сушіння і нагріву.

Залежності коефіцієнта дифузії води від середньінтегрального вологовмісту для порошків карбиду кремнію різних фракцій наведені в [6]. Коефіцієнт дифузії води зменшується зі зростанням вологовмісту (тобто зростає в процесі сушіння) особливо істотно при $u < 0,04$ кг/кг. При $\bar{u} = idem$ коефіцієнт дифузії тим вищий, чим більші частки. Як видно із рис. 1 одночасно з розміром частинок змінювалася і щільність шару, тобто його пористість. Спільне вплив цих чинників можна врахувати з допомогою еквівалентного

діаметра шару [6] $d_s = \frac{4\epsilon\bar{d}}{6(1-\epsilon)}$. Зі збільшенням еквівалентного діаметра шару коефіцієнти дифузії води різних абразивних порошків зростають тим помітніше, чим вища температура шару.

У дослідженій області зміни параметрів ефективний коефіцієнт дифузії води шару не залежить від способу підведення теплоти, початкового вмісту води, а є функцією тільки щільності шару, розміру частинок (ці фактори можуть бути враховані за допомогою еквівалентного діаметра) та середньінтегральної температури.

При аналізі зміни коефіцієнта дифузії також слід враховувати пористість матеріалу. У роботі [7] Дослідження вплив пористості пісковику на коефіцієнт дифузії води. Швидкість дифузії водяної пари, а також ізотерма сорбції пари були визначені для ряду типів пісковику. Було встановлено, що коефіцієнт опору дифузії залежить від загальної пористості пісковику. В роботі отри-

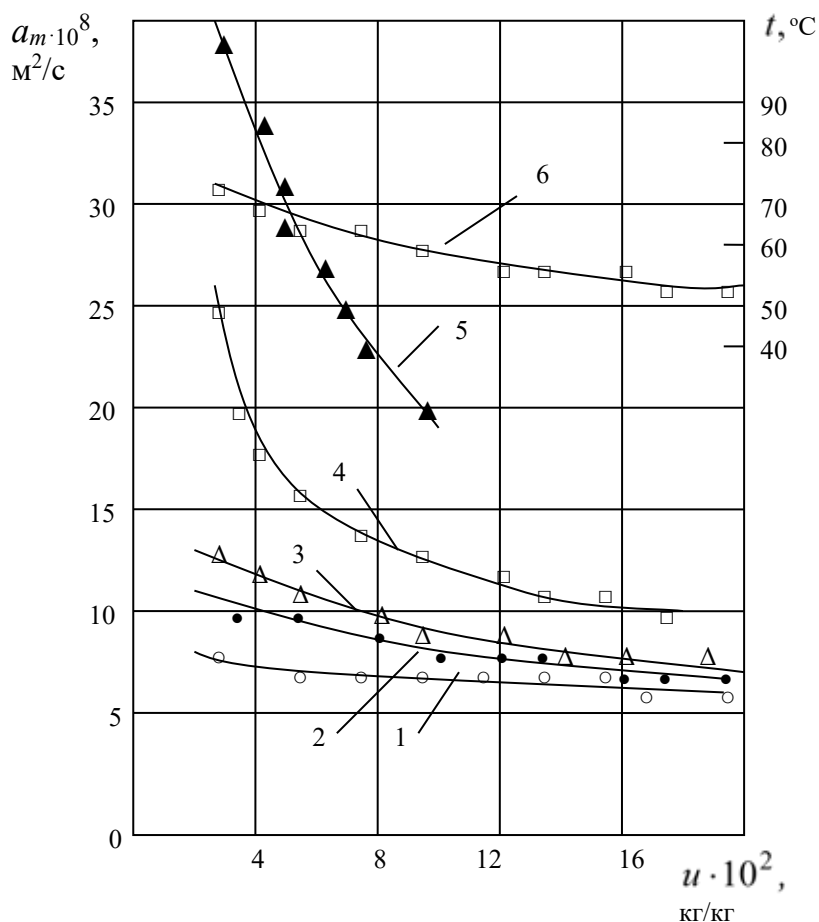


Рис. 1. Залежність ефективного коефіцієнта дифузії води від вологовмісту для порошків карбиду кремнію з різними розмірами частинок [6]

1 - $\bar{d} = 0,02$ мм, $\rho = 1350$ кг/м³; 2 - $\bar{d} = 0,05$ мм, $\rho = 1690$ кг/м³; 3 - $\bar{d} = 0,10$ мм, $\rho = 1550$ кг/м³; 4 - $\bar{d} = 0,63$ мм, $\rho = 1500$ кг/м³; 5 - $\bar{d} = 1,50$ мм, $\rho = 1040$ кг/м³; 6 - температура

мано, що для діапазону пористості від 8% до 29% залежність лінійна, значення коефіцієнту дифузії досягало $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

У [8] отримана залежність коефіцієнта дифузії водяної пари (при 25 °С) як функція середнього діаметра пор. Наведено, що для пор розміром від 10^{-8} до 10^{-7} м об'ємний коефіцієнт дифузії змінюється в діапазоні 9000-13000 мм²/год. Показано, що розмір пор впливає на визначальний механізм дифузії води, що відображається в значенні коефіцієнта дифузії: кнудсеновська диффузія, молекулярна диффузія і проміжний режим. Відзначено, що використання коефіцієнта дифузії Кнудсена, пов'язаного із середнім діаметром пор 10^{-8} м, не може пояснити значно нижчі макроскопічні коефіцієнти дифузії. Авторами [9] показано, що молекулярна адсорбція характерна для ширини пор приблизно 10^{-7} м.

У дослідженні [10] визначенні коефіцієнти дифузії видаленої води за допомогою конвекційного сушіння скибочок морквита досліджено похибку коефіцієнта дифузії на початку експерименту. Досліди проводили на скибочках моркви товщиною 15 мм в лабораторних умовах. Порівняно процеси сушіння за різними температурами сушіння з метою дослідження впливу температури на зміну коефіцієнта дифузії. Використовуючи експериментальні дані, розраховано теоретичний коефіцієнт дифузії ітераційними методами з малим часом висихання.

В роботі [11] було представлено методику визначення залежності ефективної вологопровідності від концентрації дифузанта в процесах масообміну та застосовано її для визначення під час сушіння ефективної вологопровідності гороху та її залежності від концентрації води.

Постановка завдання. Метою роботи є отримання відомостей про коефіцієнти переносу, які необхідні для аналізу процесу сушіння, а також при обробці розрахункових та дослідних даних у критеріальному вигляді. Для цього необхідно провести комплексні експериментальні дослідження кінетики сушіння, коефіцієнта дифузії та коефіцієнта термодифузії при кондуктивному та конвективному сушінні в щільному шарі цеоліту 13X, а також вивчити вплив на коефіцієнти вологоперенесення температури та вологовмісту в кінетичних режимах сушіння.

Виклад основного матеріалу. Визначення коефіцієнтів перенесення води в процесі сушіння

Із системи рівнянь [12] отримані залежності для коефіцієнтів дифузії води та відносного коефіцієнта термодифузії [4]:

$$a_m = \frac{l^2 \left[\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_I \Delta t_{II} - \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{II} \Delta t_{III} \right]}{K_m \bar{u}_{I,II} (\Delta t_{III} - \Delta t_{II})} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{K_m \bar{u}_{I,II} \left[\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_I - \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{II} \right]}{K_{ni} \left[\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{II} \Delta t_{II} - \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_I \Delta t_{III} \right]} \quad (2)$$

У формулах (1, 2): $\bar{u}$, $\bar{t}$ – середні за висотою вологовміст і температура шару, Δt_i – характерний перепад температур, K_{ni} , K_{cmi} – безрозмірні коефіцієнти, l – Висота шару, I, II – номери парних дослідів. Коефіцієнт K_m залежить від закону розподілу вмісту води в шарі, K_{ni} , K_{cmi} – від розподілу температур та того, який перепад температур Δt_i обраний як характерний.

Процес сушіння розбивають на невеликі проміжки часу, протягом яких вологовміст змінюється незначно ($\Delta u \approx 0,005 \text{ кг/кг}$). За результатами вимірювань розраховують середні за висотою вологовміст і температуру шару, швидкості сушіння і нагріву, характерний перепад температур. Підставляючи ці величини, отримані при однакових поточних вологовмістах зразків в обох дослідів, у формули (1, 2), обчислюють a_m , δ , відносячи їх до значень $\bar{u}$, $\bar{t}$. Дані, отримані для різних проміжків часу, дозволяють визначити зміну коефіцієнтів перенесення в процесі сушіння, обумовлене зміною вологовмісту і температури шару.

Режимні умови парних дослідів слід вибирати так, щоб параметри, від яких суттєво залежать коефіцієнти перенесення, відрізнялися незначно. Для досліджених умов таким параметром є температура. Для обґрунтованого визначення K_m , K_{ni} необхідно в попередніх дослідів визначити поля потенціалів за різних режимних умов та способів теплопідведення.

За експериментальними значеннями a_m , δ , може бути розрахований коефіцієнт термодифузії води:

$$a_m^T = a_m \delta, \quad (3)$$

а за наявності відомостей про масомісткість – також коефіцієнт вологопровідності:

$$\lambda_m = \rho \cdot c_m a_m \quad (4)$$

Ефективні коефіцієнти враховують сумарне перенесення рідкої та пароподібної води. У зв'язку з тим, що в кінетичних режимах сушіння відбувається взаємопов'язана одночасна зміна вологовмісту і температури шару, доцільно розглядати їх спільний вплив на коефіцієнти пере-

носу. Результати досліджень показали, що початковий вміст води практично не впливає на a_m .

На рис. 2 представлена залежність $a_m = f_2(\bar{t})$ від температури при кондуктивному сушінні цеоліту 13X.

При $\bar{u} = idem$ коефіцієнт дифузії води тим більший, чим вище температура матеріалу. Отримано, що при $\bar{d} = idem$, $\rho = idem$ коефіцієнт дифузії залежить, головним чином, від температури.

При середньоінтегральних температурах шару нижче 70 °C переважним механізмом є капілярне перенесення рідкої води та зростання a_m з підвищенням температури пояснюється, переважно, зміною властивостей (коефіцієнта в'язкості, поверхневого натягу, крайового кута змочування) води, що знаходиться у межзерновом просторі. При температурах матеріалу вище 70 °C в області низьких вологовмістів домінуючим стає дифузійне перенесення пари, інтенсивність якого помітно підвищується зі зростанням температури. Вказані причини і зумовлюють різке зростання a_m при температурах вище 70 °C.

На рис. 3 представлено зміну відносного коефіцієнта термодифузії води шару цеоліту 13X в процесах сушіння при різних температурах і способах теплопідведення. Зі зменшенням вологовмісту δ спадає за законом, близьким до лінійного, і зі зменшенням температури помітно зростає. Про збільшення відносного коефіцієнта термодифузії при зниженні температури свід-

чать дані [6] для капілярно-пористих матеріалів. Такий характер залежності обумовлений зміною в'язкості та поверхневого натягу води при зміні температури. Вказані фактори особливо суттєво впливають на значення δ в області низьких температур і високих вологовмістів, коли переважає перенесення рідкої води.

При $\bar{u} < 0,04$ кг/кг, коли пародифузійне перенесення стає визначальним, вплив температури на δ незначно. Значення δ при кондуктивному теплопідведенні нижче, ніж конвективному, внаслідок вищих середньоінтегральних температур шару (рис. 3). Таким чином, у дослідженому діапазоні зміни параметрів відносний коефіцієнт термодифузії води залежить тільки від вологовмісту і температури.

Висновки. Коефіцієнти вологоперенесення істотно змінюються в кінетичних режимах сушіння. Закономірності їх змін в залежності від температури та вологовмісту для цеоліту 13X аналогічні літературним даним.

Дослідження зміни коефіцієнтів дифузії води цеоліту у процесах кондуктивного та конвективного сушіння при близьких середньоінтегральних температурах шару свідчить про практичну незалежність коефіцієнта дифузії води від способу теплопідведення за умови, що температури незначно відрізняються.

Дані по кінетиці процесу та коефіцієнтам теплоперенесення при кондуктивному сушінні

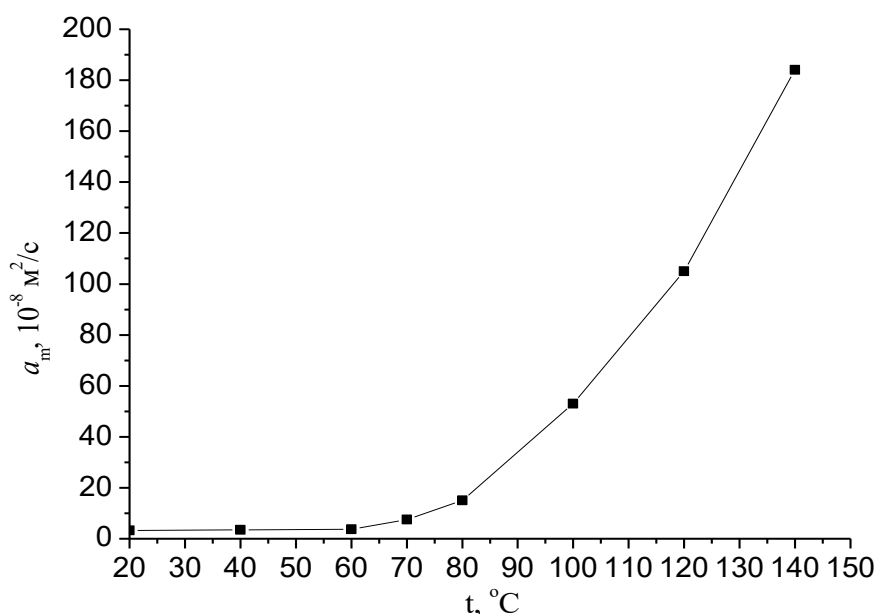


Рис. 2. Зміна ефективного коефіцієнта дифузії води цеоліту 13X у процесі сушіння $\rho = 682$ кг/м³, $d = 2,2$ мм

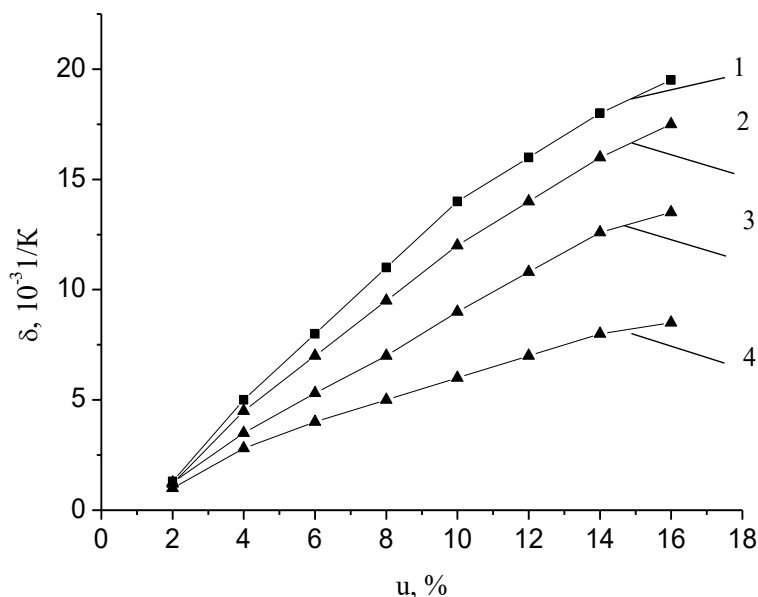


Рис. 3. Зміна відносного коефіцієнта термодифузії у процесі сушіння щільного шару цеоліту 13X. ($\rho = 682 \text{ кг/м}^3$, $d = 2,2 \text{ м}$). 1 – конвективне сушіння, $\bar{t} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$; 2–4 – кондуктивне сушіння, 2 – $\bar{t} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $\bar{t} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $\bar{t} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

можуть бути використані при розрахунку поверхневих сушарок для дисперсних матеріалів, для контролю технологічних параметрів та при проектуванні нового або модернізації наяв-

ного обладнання. Відомості про коефіцієнти перенесення необхідні також при розрахунковому аналізі процесу сушіння, критеріальний обробці даних.

Список літератури:

1. Determination of diffusion and convective transfer coefficients in food drying revisited: A new methodological approach / F. J. Arranz et al. *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 162. P. 30–39. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.07.005>
2. Pathare P. B., Sharma G. P. Effective Moisture Diffusivity of Onion Slices undergoing Infrared Convective Drying. *Biosystems Engineering*. 2006. Vol. 93, no. 3. P. 285–291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.12.010>
3. Martínez Vera C., Vizcarra Mendoza M. G. Concentration-dependent moisture diffusion coefficient estimation in peas drying considering shrinkage: An observer approach. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 218. P. 256–273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.016>
4. Рева Н.В Розробка методики та дослідження коефіцієнтів масо- та теплоперенесення капілярно-пористих матеріалів у процесі сушіння. Дис. канд. техн. наук, Одеса, 1982, 220с,
5. Ву З. Т. Тепловологоперенесення у дисперсних матеріалах при кондуктивному сушінні: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одеса, 1992. 17 с
6. Календер'ян, В.О., Бошкова І.Л. Тепломасоперенесення в апаратах із щільним шаром дисперсного матеріалу. – Київ: Слово, 2011. – 184 с
7. Water Vapor Diffusion and Adsorption of Sandstones: Influence of Rock Texture and Composition / M. Keppert et al. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 2016. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1155/2016/8039748>
8. Water Vapor Diffusion Properties of Obernkirchener Sandstone: Analysis of Dvs Data / C. Pichler et al. *SSRN Electronic Journal*. 2022. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4103929>
9. Numerical analysis of moisture vapor diffusion in asphalt mixtures using digital images / E. Arambula et al. *Materials and Structures*. 2009. Vol. 43, no. 7. P. 897–911. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9554-3>
10. Aivars Aboltins1, Tatjana Rubina1 Egle Jotautiene Diffusion coefficient estimation difficulties at the beginning of drying experiment ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. – 2017. – 1327-1332

11. Martínez Vera C., Vizcarra Mendoza M. G. Concentration-dependent moisture diffusion coefficient estimation in peas drying considering shrinkage: An observer approach. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 218. P. 256–273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.04.016>
12. Lykov AV Theory of heat and mass transfer. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1965. 558 p.

Boshkov L.Z., Volgusheva N.V., Hrechanovskyi A.P., Garanin Ye.V. COEFFICIENTS OF DIFFUSION AND THERMAL DIFFUSION OF MOISTURE IN A DENSE LAYER OF ZEOLITE 13X

The work is devoted to the determination of heat and moisture transfer coefficients in zeolite 13X in the form of a dense layer of dispersed material. It is emphasized that the availability of accurate values or reliable expressions for moisture diffusion coefficients in the materials under study is of particular importance. It is noted that the assessment of phenomenological parameters included in the mass and heat transfer equations is a general problem of engineering tasks in the field of heat and power engineering, the solution of which is necessary for modeling, designing and optimizing drying processes. It is proved on the basis of an analytical review of scientific literature that when analyzing the change in the diffusion coefficient, the porosity of the material should be taken into account due to the fact that the pore size affects the determining mechanism of moisture diffusion and is reflected in the value of the diffusion coefficient (Knudsen diffusion, molecular diffusion). The dependence of the moisture diffusion coefficient on moisture content, temperature, pore size and determining particle size for various dispersed materials is analyzed. Calculation formulas for determining the moisture diffusion coefficients, relative thermal diffusion coefficient and moisture conductivity, as well as the experimental data processing method are presented. The change in the moisture diffusion and thermal diffusion coefficients for zeolite 13X depending on temperature and moisture content in the processes of conductive and convective drying, which is obtained on the basis of experimental studies, is presented. The dependence of the moisture diffusion coefficient on temperature during conductive drying of zeolite 13X is presented graphically. It is proved that the moisture diffusion coefficient practically does not depend on the method of heat supply, provided that the temperatures differ slightly. It is shown that in the studied range of parameter changes, the relative thermal diffusion coefficient of moisture depends only on moisture content and temperature. It is determined that the patterns of changes in the transfer coefficients depending on temperature and moisture content for zeolite 13X are similar to the literature data.

Key words: drying, conductive, convective, moisture content, temperature, dispersed material, experiment.

Пантелєєва І.В.

ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія»

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕГАЗОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Актуальним питанням сучасності є дослідження можливостей використання елегазу, зокрема його унікальних фізико-хімічних властивостей, які роблять його одним із найефективніших ізоляційних середовищ для електротехнічного обладнання. Водночас актуальність його застосування обумовлена необхідністю забезпечення надійності та безпеки енергетичних систем, зокрема високовольтного обладнання, в умовах підвищених вимог до компактності та ефективності, а також обмежень, пов'язаних з його впливом на екологію. У статті систематизовано аспекти розвитку елегазу, розглянуто основні етапи впровадження елегазового середовища як ізоляції електротехнічного обладнання. Представлено порівняльні характеристики електричної міцності різних ізоляційних речовин. Проаналізовано сучасні приклади застосування елегазу в автоматичних вимикачах середньої та високої напруги, а також його сумішей у газовій ізоляції високовольтних ліній електропередачі. Визначено перспективи розвитку застосування елегазу в газоізованих лініях електропередачі, наведено їх конструктивні особливості та приклади практичного використання.

Актуальним питанням сучасності є дослідження можливостей використання елегазу, а також обмежень, пов'язаних з його впливом на екологію. У статті систематизовано аспекти розвитку елегазу, розглянуто основні етапи впровадження елегазового середовища як ізоляції електротехнічного обладнання. Представлено порівняльні характеристики електричної міцності різних ізоляційних речовин. Проаналізовано токсичні продукти розкладання елегазу, які становлять значну загрозу, а також його властивості як парникового газу. Обґрунтовано можливості зменшення обсягу використання елегазу за рахунок переходу на газові суміші. Проаналізовано сучасні приклади застосування елегазу в автоматичних вимикачах середньої та високої напруги, а також його сумішей у газовій ізоляції високовольтних ліній електропередачі. Визначено перспективи розвитку застосування елегазу в газоізованих лініях електропередачі, наведено їх конструктивні особливості та приклади практичного використання.

Ключові слова: елегаз, електрична міцність, ізоляційне середовище, розподільний пристрій, електротехнічне обладнання, елегазовий вимикач, підстанція з елегазовою ізоляцією, парниковий газ, екологічні вимоги.

Постановка проблеми. У центрі молекули елегазу (SF₆) розміщений атом сірки, а на рівній відстані від нього у вершинах правильного октаедра розташовуються шість атомів фтору. Це визначає високу ефективність захоплення електронів молекулами, їх відносно велику довжину вільного пробігу і слабку реакційну здатність. Елегаз відрізняється високою електричною міцністю. Іншими важливими характеристиками цієї речовини є висока теплоємність та значний коефіцієнт теплового розширення. Завдяки цим властивостям елегаз успішно застосовується як ефективне середовище для гасіння дуги, охолодження та ізоляції [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Після Другої світової війни, у 1960 році було розпочато серійне виробництво елегазу, яке спрямовувалося на будівництво електростанцій у США

та Європі. У цей період компанія Merlin Gerin розробила перші комутаційні апарати, які використовували елегаз як ізоляційне та дугогасне середовище для високої (35–230 кВ) та надвисокої (понад 230 кВ) напруги.

У 1964 році компанія EDF (Франція) ініціювала проектування першої у світі підстанції з елегазовою ізоляцією, яку ввели в експлуатацію в 1966 році неподалік Парижа. За іншими джерелами [3], перший розподільний пристрій з елегазовою ізоляцією, розрахований на номінальну напругу 170 кВ, було створено в Цюріху того ж року. Однак ключовим залишається не стільки точна дата початку, скільки значущість цих подій для розвитку технології. Це обумовлено вищезгаданими перевагами елегазу, серед яких основною, у контексті його застосування в комплектних розподільних пристроях (КРУ), є його чудові ізоляційні властивості.

Елегаз характеризується електричною міцністю, яка, залежно від зовнішніх умов (тиску та температури), перевищує міцність повітря у 2–3 рази (рис. 1).

Висока електрична міцність елегазу дає можливість зменшити ізоляційні відстані в електроустановках, що дозволяє значно скоротити розміри КРУЕ. Це, у свою чергу, має важливе практичне значення там, де площа має надзвичайно високу цінність: торгові центри, офісні будівлі, промислові підприємства, а також термінали аеропортів і вокзалів. Використання електрообладнання з елегазовою ізоляцією у відкритих розподільчих при-

строях (ВРП) високої та надвисокої напруги дозволяє значно скоротити займану площу (рис. 2).

Дещо раніше винятком були КРП з елегазовою ізоляцією на номінальну напругу 35 кВ, що виготовлялися Рівненським заводом високовольної апаратури (РЗВА).

У 2010 році на виставці ELCOM-2010 у Києві підприємство презентувало це обладнання. Проте на сьогодні його виробництво припинено, і на офіційному сайті компанії відсутня будь-яка інформація щодо можливості виготовлення цього обладнання чи його продажу підприємствам-замовникам.

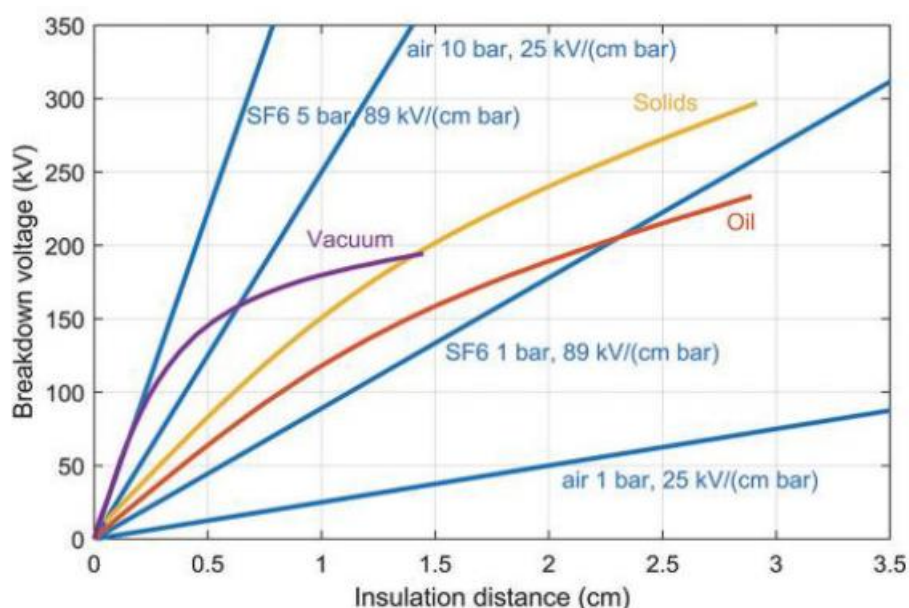


Рис. 1. Електрична міцність для різних середовищ

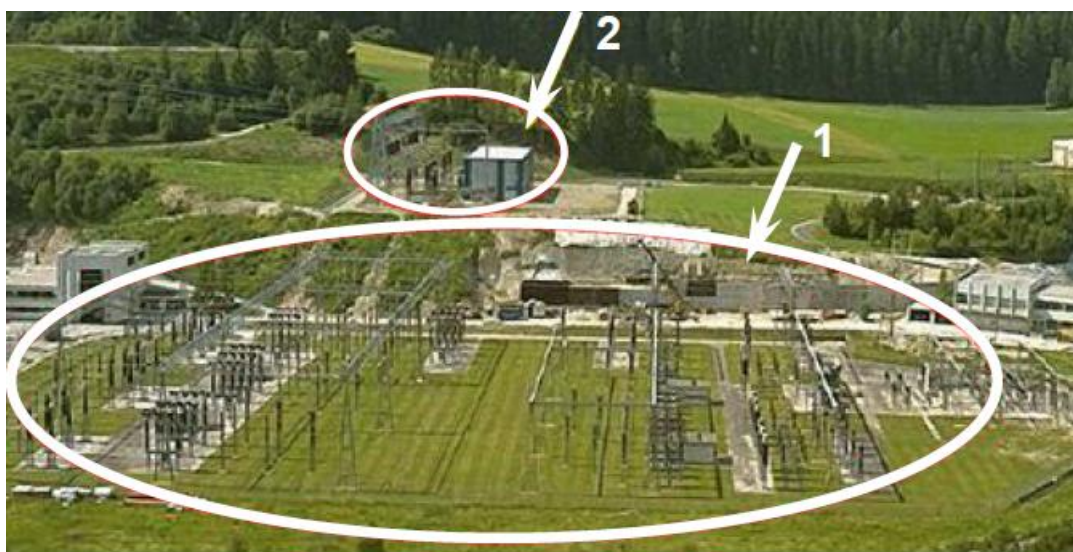


Рис. 2. Порівняння відкритого розподільного пристрою (ВРП) напругою 220 кВ з повітряною (1) та елегазовою (2) ізоляцією

У більш сучасних КРУЕ як комутаційний апарат застосовується вакуумний вимикач ВРС-35, три полюси якого разом із системою збірних шин розташовані в повністю герметичному баку, заповненому елегазом. Три полюси вимикача з'єднані з пружинним приводом, розташованим у верхній частині фасаду КРУЕ, за допомогою ізолюючих тяг і сильфонів. Використання елегазової ізоляції дозволило зменшити міжполюсну відстань вакуумного вимикача та скоротити відстань між збірними шинами.

КРУЕ типу КУ35С має низку важливих переваг, серед яких екологічна безпека, висока надійність, зручність обслуговування, широкий вибір типових виконань і схем релейного захисту та автоматики на базі мікропроцесорів різних типів. Крім того, завдяки використанню елегазової ізоляції в герметичному корпусі, обладнання можна встановлювати на об'єктах, розташованих у складних кліматичних умовах, таких як пил, бруд або соляний туман [4].

Сучасні технічні розробки провідних світових електротехнічних компаній здебільшого зосереджені на покращенні існуючих конструкцій КРПЕ, удосконалюються шляхом інтеграції функцій різних електричних апаратів у єдиний модуль. Наприклад, в одному пристрої можуть поєднуватися функції вимикача (switch), роз'єднувача та заземлювача, а також шляхом розміщення всіх трьох фаз в одній оболонці [5]. Такі технічні рішення роблять електрообладнання більш компактним, зменшують площу, необхідну для встановлення КРПЕ, і зменшують простір приміщень. У результаті покращуються загальні техніко-економічні показники. Світові корпорації активно працюють над пошуком альтернатив електричного газу, який, як відомо [6, 7], належить до парникових газів. Розглядаються варіанти його заміни на суміші електричного газу з іншими газами або повна відмова від електричного газу на користь екологічно безпечних газів та їхніх сумішей.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження етапів розвитку електричного газу як ізоляційного середовища, аналіз сучасного стану питання та оцінка його перспектив на майбутнє з урахуванням впливу на довкілля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Згідно зі статистикою, світова потреба в електроенергії щороку зростає на 2–3 %. До основних причин цього явища належать значне збільшення чисельності населення, особливо в країнах Азії, підвищення середньої тривалості життя та посилення урбанізації. У результаті виникає потреба

в передачі все більшого обсягу електроенергії до великих міст, передміських зон і промислових підприємств, забезпечуючи при цьому мінімальні втрати.

Одним із наслідків цього розвитку подій є активна модернізація електричних мереж у країнах Європи, де напругу підвищують із 220 кВ до 380 кВ [8]. У мегаполісах будується все більше розподільчих підстанцій, розрахованих на надвисоку напругу понад 380 кВ. Подібна тенденція спостерігається і в інших світових мегаполісах, таких як Шанхай, Сідней та Мехіко. Саме тому підстанції з елегазовою ізоляцією, розроблені близько 65 років тому, стають дедалі актуальнішими сьогодні. Як показує світова практика, елегазові підстанції не тільки потребують значно менше простору порівняно з аналогічними підстанціями, що використовують повітряну ізоляцію, залежно від рівня робочої напруги, але й не залежать від умов навколишнього середовища і можуть бути встановлені на обмежених площах, що вже відзначалося. Їх також можна розміщувати під поверхнею відкритих майданчиків для відпочинку та розваг.

Як зазначено в [9], у мережах із середньою напругою 6–35 кВ зазвичай використовуються вакуумні вимикачі. Однак із підвищенням напруги понад 35 кВ найбільш поширеними стають вимикачі з елегазовою ізоляцією (рис. 3).

Високовольтні вимикачі (понад 35 кВ) з елегазовою ізоляцією здійснюють відключення струму шляхом розмикання контактів у середовищі електричного газу. Цей газ має значно кращі діелектричні властивості порівняно з повітрям і маслом, а також ефективно гасить електричну дугу. Після розмикання контактів струм проходить через дугу, яка припиняється, коли потік електричного газу достатньої інтенсивності охолоджує її.

Щоб успішно загасити електричну дугу, потік електричного газу повинен швидко охолодити її, знижуючи температуру між контактами вимикача з початкових 20 000 К до менше ніж 2 000 К всього за кілька сотень мікросекунд. Для ефективного гасіння дуги змінного струму та уникнення її повторного виникнення критично важливо, щоб електрична міцність міжконтактного проміжку відновлювалася швидше, ніж напруга на контактах апарата. Це дозволяє ефективно протистояти відновленню перехідної напруги після гасіння дуги.

Поєднання ізоляційних рішень, заснованих на використанні електричного газу, з елементами традиційної повітряної ізоляції називають гібридним дизайном або комбінованою конструкцією. У деяких



Рис. 3. Порівняння вакуумного вимикача (ліворуч) на напругу 35 кВ та елегазового вимикача (праворуч) на напругу 35 кВ для внутрішньої установки

випадках така конструкція може забезпечити значні переваги, зокрема зменшення займаного простору та можливість використання на надвисоких рівнях напруги.

Комбінована технологія може охоплювати діапазон напруги від 110 кВ до 1000 кВ. Її було вперше застосовано на гідроелектростанції Yellow River Laxiwa в Китаї, яка стала першою в країні станцією з напругою 800 кВ. Вона розташована на висоті близько 2500 метрів над рівнем моря [10]. У подібних високогірних районах із надвисокою напругою використання стандартних кабелів із зшитого поліетилену неможливе.

Завдяки модульному підходу до проектування, практично всі можливі конфігурації розподільчих пристроїв з елегазовими компонентами можуть бути реалізовані на основі сучасного гібридного дизайну. Нові вимоги електроенергетики, такі як вищі рівні напруги передавання, збільшення обсягів електроенергії та забезпечення екологічної стійкості, створюють нові виклики та стимулюють пошук інноваційних інженерних рішень для вдосконалення способів транспортування електроенергії.

У минулому підстанції будувалися виключно з функціональної точки зору, як об'єкти для підтримки розвитку інфраструктури. Сучасні конструкції, навпаки, дозволяють економити цінний та дорогий простір завдяки впровадженню передових технологій, таких як елегазові комплектні розподільчі пристрої (КРПЕ) та газоізолювані лінії електропередачі. Вони забезпечують високу ефективність, відповідають суворим екологічним стандартам і надають максимальну гнучкість

у використанні. Сучасні інженерні рішення в проектуванні КРПЕ дозволили суттєво зменшити простір, необхідний для їх розміщення, а також знизити витрати матеріалів і обсяг використаного елегазу SF₆. При цьому були значно покращені захисні властивості обладнання.

У випадку неоднорідного електричного поля виникають локальні перенапруження, які спричиняють коронні розряди. Під впливом цих розрядів елегаз розкладається, утворюючи нижчі фториди (SF₂, SF₄), що мають шкідливий вплив на матеріали, використані в конструкціях КРПЕ. Для запобігання виникненню коронних розрядів усі поверхні металевих елементів КРПЕ та екранів повинні мати чисту та гладку текстуру без значної шорсткості чи задирок. Це вимога є обов'язковою, оскільки забруднення, пил і металеві частки можуть створювати локальні напруження електричного поля, що знижує електричну міцність елегазової ізоляції КРПЕ.

Таким чином, завдяки високій електричній міцності елегазу можна зменшити ізоляційні проміжки та відстані при низькому робочому тиску елегазу, що, у свою чергу, дозволяє знизити масогабаритні характеристики електротехнічного обладнання.

Підсумовуючи використання елегазу як ізоляційного середовища, можна відзначити, що висока пробивна напруга шестифтористої сірки забезпечує її роль електричного газу. Відомо, що при нормальному тиску пробивна напруга елегазу становить 89 кВ/см, що майже втричі перевищує показник для повітря. Саме завдяки цій властивості елегаз активно і ефективно використову-

ється як ізоляційний матеріал у різних електричних установках середньої та високої напруги.

Оскільки елегаз не є токсичним, він відноситься до 4 класу небезпеки, що вказує на його малу небезпеку для здоров'я. Цей газ не має ані кольору, ані запаху, а також володіє високими охолоджувальними властивостями. Окрім того, елегаз є значно важчим за повітря – його вага в п'ять разів більша. Завдяки таким характеристикам елегаз використовують також у системах газового пожежогасіння [11].

Завдяки високим охолоджувальним властивостям, підвищеній пожежній безпеці та хімічній стійкості, використання елегазу в електроустановках дозволяє збільшити струмове навантаження на 25 % порівняно з традиційною повітряною ізоляцією, навіть при нормальному тиску. Якщо тиск підвищується, електрична міцність також зростає, і за певних умов вона може перевищити аналогічні показники для рідких та твердих діелектриків.

Попри численні переваги, елегаз має і певні недоліки. Зокрема, при підвищенні тиску та зниженні температури елегаз може переходити з газоподібного стану в рідкий. Цю проблему вдалося вирішити шляхом змішування чистого елегазу з іншими газами, які переходять у рідку фазу при значно нижчій температурі, хоча вони і мають меншу електричну міцність. Наприклад, при додаванні азоту до елегазу, суміш, що складається з 30 % азоту і 70 % елегазу, переходить у рідкий стан при тиску 8 МПа та температурі -45°C . Однак такі добавки призводять до зниження електричної міцності ізоляційного середовища.

Щоб уникнути переходу елегазу в рідку фазу, застосовується його підігрів. Це просте рішення дозволяє використовувати елегаз у закритих розподільчих пристроях, оснащених опаленням. Для електроустановок на відкритому повітрі також необхідна система підігріву. Крім того, комбіноване використання газових сумішей різного складу та підігріву забезпечує оптимальні умови для експлуатації в різних кліматичних зонах.

У якості прикладу розглянуто КРУЕ SafeRing, виробництва концерну ABB [12, 13], призначене для вторинного розподілу електричної енергії, здебільшого в міських електричних мережах, побудованих за кільцевим принципом. Це обладнання працює при напрузі 6–10 кВ і підтримує відносно низькі робочі струми збірних шин (до 630 А). Основною метою КРУЕ SafeRing є забезпечення захисту трансформаторів потужністю до 630 кВА. Система SafeRing представляє собою комплекс герметичних блоків, виготовлених із нержавіючої сталі,

в яких розміщуються два, три або чотири модулі з електричними пристроями. Це можуть бути трипозиційні перемикачі, вакуумні силові вимикачі, плавкі запобіжники, заземлювачі та пристрої для захисту від коротких замикань. Усі ці апарати знаходяться в герметичному контейнері (апаратному відсіку А – рис. 4), заповненому елегазом.



Рис. 4. КРУЕ SafeRing: А – апаратні відсіки, Б – відсік управління, В – кабельний відсік

У систему SafeRing входять чотири види модулів, кабельними виводами, що закінчуються знизу, а зверху приєднуються до загальної живильної шини.

Основні технічні характеристики КРУЕ SafeRing наведено у табл. 1.

Таблиця 1
Основні технічні характеристики SafeRing

Параметр	Значення
Номинальна напруга, кВ	12–24
Номинальний струм збірних шин, А	630
Номинальний струм відключення силового вакуумного вимикача, кА	16–21
Номинальний струм термічної стійкості 3 с, кА	21
Номинальний струм електродинамічної стійкості, кА	52,5
Габаритні розміри:	
– ширина, мм	325
– глибина, мм	765
– висота, мм	1336
Маса	320–380

Хоча елегаз не є токсичним, він має властивість накопичуватися на нижніх поверхнях підстанцій через свою велику щільність, що в п'ять разів перевищує щільність повітря. Це може призвести до утворення зон з високою концентрацією елегазу, який витісняє кисень і становить небезпеку для людей. Тому при проєктуванні таких підстанцій згідно з ПУЕ обов'язково враховуються вентиляційні системи для забезпечення безпеки.

Успіх використання елегазових вимикачів можна пояснити такими перевагами:

- Простота конструкції дугогасної камери, хоча вона і складніша порівняно з вакуумною камерою.
- Автономність у роботі, що не вимагає втручання людини для експлуатації.
- Здатність до досягнення високої ефективності при вимиканні струму короткого замикання до 63 кА.
- Можливість експлуатації без потреби в поповненні елегазу протягом 20 років.
- Здатність створювати компактні розподільчі пристрої.
- Висока надійність за відносно невисокою ціною.

Елегаз не має шкідливого впливу на метали, пластики та інші матеріали, що використовуються у конструкціях елегазового обладнання. Однак, незважаючи на численні переваги використання елегазової ізоляції, існують певні недоліки та актуальні проблеми, пов'язані з її застосуванням [14].

Однак, попри всі переваги використання елегазової ізоляції, існують певні недоліки та актуальні проблеми, пов'язані з її застосуванням, зокрема:

1. Елегаз належить до категорії газів, які сприяють утворенню так званого «парникового ефекту» [15]. Елегаз SF₆ є найсильнішим із відомих на сьогодні парникових газів. Його вплив у 23 900 разів потужніший, ніж у такої ж кількості діоксиду вуглецю (CO₂), оскільки він ефективніше затримує інфрачервоне випромінювання, і зберігається в атмосфері до 3200 років. Викид 1 кг елегазу в навколишнє середовище еквівалентний за впливом на парниковий ефект викиду 23 900 кг діоксиду вуглецю (CO₂). Крім того, елегаз починає розкладатися при температурі близько 500 °C, тоді як при 20 °C його розкладання в атмосфері триває понад 3200 років.

Елегаз може непередбачено потрапляти в навколишнє середовище через аварійні ситуації або витіки, що виникають на різних етапах експлуатації електрообладнання. У деяких випадках

причиною витоків стає застаріле обладнання. Крім того, викиди газу можуть відбуватися під час його виробництва, монтажу, технічного обслуговування, ремонту або утилізації обладнання, яке виводиться з експлуатації.

2. Токсичність речовин, що утворюються при розпаді елегазу. У обладнанні, яке використовує елегаз, його частковий розпад може відбуватися як під час нормальної роботи та виконання комутаційних операцій, так і в умовах аварійних режимів або виникнення електричних дуг. Сучасні конструкції електрообладнання з елегазовим середовищем часто застосовують автокомпресійний принцип гасіння електричної дуги. Під впливом високих температур, що виникають під час горіння дуги, елегаз розкладається, утворюючи різні хімічні сполуки. Для нейтралізації продуктів розкладання елегазу використовуються спеціальні адсорбуючі матеріали, такі як активовані оксид алюмінію, цеоліт та інші [16]. Окрім того, у конструкції електрообладнання інтегрують молекулярні сита. Оксид алюмінію виконує додаткову функцію осушення елегазу, що дозволяє зберігати його початкові електричні характеристики.

Для зменшення техногенного впливу елегазу на навколишнє середовище його можна повторно використовувати. Для цього газ відкачують зі спеціальних наповнених відсіків, очищують за допомогою спеціального обладнання, контролюють його якість, і лише після цього застосовують повторно.

3. Як відомо [16], елегаз приблизно в 5 разів важчий за повітря, тому в об'єктах, де використовується обладнання з його застосуванням, важливо дотримуватись правил безпеки. Особливу увагу слід приділяти входу в замкнуті простори, розташовані нижче рівня землі, такі як підвали чи тунелі, де можливе скупчення елегазу. Це необхідно для запобігання ризику витіснення повітря та заміщення кисню елегазом.

Якщо вміст кисню в повітрі, що вдихається, знижується нижче 17 % і/або вміст елегазу перевищує 19 %, це створює значну загрозу задухи для персоналу, що працює в таких умовах. Найбільш небезпечними є ділянки, розташовані нижче рівня землі та з поганою або відсутньою вентиляцією, такі як кабельні камери, кабельні поверхи, тунелі, колодязі, канали, дренажні системи, оглядові колодязі, підвали та інші подібні приміщення.

4. Складність конструкцій пристроїв з елегазом. Відомо, що в елегазових вимикачах під час їх відключення потік газу забирає тепло від електричної дуги, що дозволяє погасити її під

час першого проходження струму через нульове значення. Потреба в розробці механізму дуття зумовлює складність конструкції керуючого механізму пристрою, що, в свою чергу, збільшує його вартість.

Сучасні конструкції елегазових розподільних пристроїв не лише компактні та ефективні у використанні, але й відзначаються зниженими вимогами до енергоспоживання під час виробництва, раціональним використанням ресурсів і більш тривалим терміном служби. Додатково, ці системи вимагають мінімальних витрат на технічне обслуговування, що робить їх вигідними інвестиціями в майбутнє. Таким чином, їх застосування є важливим внеском у підвищення енергоефективності, якості та надійності енергопостачання в цілому.

Традиційним підходом до вирішення цієї проблеми є вжиття заходів для зменшення викидів елегазу, вдосконалення конструкцій обладнання, навчання персоналу правильному поводженню з елегазом, а також обмеження використання елегазу через його змішування з іншими газами, такими як азот.

Більш радикальним підходом є повна відмова від використання елегазу, як це, наприклад, зробила компанія Schneider Electric, припинивши випуск розподільних пристроїв середньої напруги з елегазовою ізоляцією. На їх місце прийшло так зване SF₆-free обладнання, яке використовує очищене осушене повітря під тиском 8–9 атмосфер як ізоляційне середовище. Однак, ймовірно, для повної відмови від елегазу в галузі електроенергетики та електромеханіки знадобиться чимало часу, і процес не завершиться за один рік.

Як свідчить практика, в сучасній енергетиці значно зменшилися рівні витоків елегазу як під час експлуатації, так і на етапах виробництва, випробувань та введення в експлуатацію. Очікується, що ринок SF₆-free обладнання буде активно зростати, і виробники продовжуватимуть роз-

робку нових технологій для ще більшого спектра завдань і для вищих рівнів напруги. Крім того, варто зазначити, що в майбутньому будуть створені вакуумні вимикачі та вакуумні камери (переривники) для високих класів напруги.

Висновки. У статті здійснено детальний аналітичний огляд сучасних розподільних пристроїв середньої напруги в діапазоні 6–35 кВ, що використовують елегазову ізоляцію, від провідних світових виробників. Вивчено основні технічні характеристики, переваги та недоліки цих пристроїв, а також порівняння з традиційними розподільними пристроями України, які застосовують повітряну ізоляцію.

Акцентовано увагу на енергетичній ефективності, надійності, компактності та безпеці елегазових розподільних пристроїв, а також на можливостях їх застосування в умовах сучасного енергетичного ринку. Крім того, розглянуто економічні аспекти переходу на нові технології, зокрема вартість обслуговування та технічного підтримання таких пристроїв.

Визначено перспективи розвитку та адаптації цих технологій в Україні, з урахуванням інфраструктурних особливостей та потреб національної енергетичної системи.

Загалом, в довгостроковій перспективі повна відмова від використання елегазу, ймовірно, є єдиним ефективним способом подальшого зменшення його викидів. З огляду на сучасні дослідження та розробки, це здається технічно можливим для електроенергетики. Однак такий шлях розвитку є високовартісним і вимагає підтримки як державних органів, так і зацікавленого бізнесу.

Необхідно підтримувати та прискорювати перехід до такого розвитку, ставити амбіційні цілі та завдання, орієнтуючись на майбутнє, доки нові електрообладнання не стануть вільними від елегазу, а застаріле елегазове обладнання, яке ще використовується, не буде замінене на сучасне SF₆-free обладнання та утилізоване.

Список літератури:

1. A. Boskovic et al. Sulphur hexafluoride in modern medium-voltage switchgear: advantages, hazards, and environmental impact. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2024. Vol. 89, № 5. P. 693–704. DOI: <https://doi.org/10.2298/jsc231203008b>.
2. Зарубіжний досвід енергетичної статистики міжнародних організацій (МЕА, Євростат, ООН). Нормативно-правове забезпечення та автоматизовані системи збору і оброблення інформації енергетичної статистики. Київ, 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/5. – Statystyka-energetyki.pdf>
3. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.energobalans.com/>.
4. Regulation (EU) No. 517/2014 of the European Parliament and of the Council on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No. 842/2006. *Official Journal of the European Union*. 2019. 20 May. P. 195–230. URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/eur133686.pdf>.

5. Yeckley R. N., Colclaser R. G. First SF6 breaker design: Westinghouse engineers tell the inside story [History]. IEEE Power and Energy Magazine. 2018. Vol. 14, no. 3. P. 80–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/mpe.2016.2525238>
6. Franck C. M., Chachereau A., Pachin J. SF6-free gas-insulated switchgear: current status and future trends. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2021. Vol. 37, no. 1. P. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2021.9290463>.
7. Purnomoadi A. P., Rodrigo Mor A., Smit J. J. Spacer flashover in Gas Insulated Switchgear (GIS) with humid SF6 under different electrical stresses. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 116. 105559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105559>.
8. SIEMENS AG. Switchgear Type 8DH10 up to 24 kV, Gas-Insulated, Extendable. Medium-Voltage Switchgear. Catalog HA 41.11. 2018. 44 p. URL: <http://www.infrastructure>
9. ABB. SafeRing/ SafePlus 36 Gas Insulated Secondary Switchgear. 2022. 94p. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VDD006114%20GB&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=B>.
10. B. Pan. Green gas for grid as an eco-friendly alternative insulation gas to SF6: a review Applied Sciences. 2020. Vol. 10, no. 7. 2526. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072526>
11. J. Owens et al. Recent development of two alternative gases to SF6 for high voltage electrical power applications. Energies. 2021. Vol. 14, no. 16. 5051. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14165051>.
12. B. Pan, G. Wang, H. Shi, J. Shen, H.-K. Ji, and G.-S. Kil, “Green gas for grid as an eco-friendly alternative insulation gas to SF6: A review”, Applied Sciences, vol. 10, no. 7, Apr. 2021, Art. no. 2526, DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072526>
13. J. Owens, A. Xiao, J. Bonk, M. DeLorme, and A. Zhang. Recent development of two alternative gases to SF6 for high voltage electrical power applications, Energies, vol. 14, no. 16, Aug. 2021, Art. no. 5051, doi: <https://doi.org/10.3390/en14165051>
14. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс (видання друге): навчальний посібник. Харків. 2018, 400 с.
15. Розподільні пристрої з елегазовою ізоляцією SafeRing & SafePlus: безпечність, надійність, компактність. Електротехніка та електромеханіка. 2020, № 6. С. 74–78.
16. IEC 60529. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code).

Pantielieieva I.V. PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ELEGAS ELECTRICAL EQUIPMENT IN ENERGY SYSTEMS

A topical issue of our time is the study of the possibilities of using SF6, in particular its unique physicochemical properties, which make it one of the most effective insulating media for electrical equipment. At the same time, the relevance of its use is due to the need to ensure the reliability and safety of energy systems, in particular high-voltage equipment, in conditions of increased requirements for compactness and efficiency, as well as restrictions related to its impact on the environment. The article systematizes aspects of the development of SF6, considers the main stages of the introduction of SF6 medium as insulation for electrical equipment. Comparative characteristics of the electrical strength of various insulating substances are presented. Modern examples of the use of SF6 in medium and high voltage circuit breakers, as well as its mixtures in gas insulation of high-voltage power transmission lines, are analyzed. The prospects for the development of the use of SF6 in gas-insulated power transmission lines are determined, their design features and examples of practical use are given.

A topical issue of our time is the study of the possibilities of using SF6, as well as the limitations associated with its impact on the environment. The article systematizes aspects of the development of SF6, considers the main stages of the introduction of SF6 as an insulation medium for electrical equipment. Comparative characteristics of the electrical strength of various insulating substances are presented. Toxic decomposition products of SF6, which pose a significant threat, are analyzed, as well as its properties as a greenhouse gas. The possibilities of reducing the volume of SF6 use by switching to gas mixtures are substantiated. Modern examples of the use of SF6 in medium and high voltage circuit breakers, as well as its mixtures in gas insulation of high-voltage power transmission lines, are analyzed. Prospects for the development of the use of SF6 in gas-insulated power transmission lines are determined, their design features and examples of practical use are given.

Key words: SF6, electrical strength, insulating medium, switchgear, electrical equipment, SF6 circuit breaker, SF6 insulated substation, greenhouse gas, environmental requirements.

Риндюк Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Беднарська І.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ПАРОВОГО СИТА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАННИЙ СТАН РЕГУЛЮВАЛЬНОГО КЛАПАНА

У статті досліджено вплив парового сита на напружено-деформований стан (НДС) регулювального клапана парової турбіни К-1000-60/3000, який є важливим елементом паророзподільної системи атомних електростанцій України. Надійність та безпека роботи цього обладнання є критично важливими, адже дефекти металу корпусу клапана можуть призводити до аварійних ситуацій. Використано сучасні методи математичного моделювання для аналізу газодинамічних процесів і розрахунку НДС із врахуванням конструктивних особливостей клапана, зокрема парового сита. Моделювання виконано із застосуванням спеціалізованих програмних комплексів FloEFD та SolidWorks Simulation. Газодинамічні розрахунки проводилися на основі рівнянь Нав'є-Стокса для стисливого потоку з урахуванням законів збереження енергії, маси та імпульсу. Врахування впливу парового сита дозволило отримати детальні дані про розподіл тисків, швидкостей та температур у середині клапана. Результати дослідження показали, що парове сито створює локальний опір, який значно впливає на нерівномірність розподілу температурного поля та турбулентність потоків пари. Пояснено вплив дисипації енергії, яка посилюється через зіштовхування потоків пари, на виникнення локальних градієнтів температури та напружень, що виявляються одними з причин утворення мікротріщин у металі корпусу клапана. Проведений аналіз продемонстрував, що ігнорування впливу парового сита призводить до заниження рівня напружень у зонах розтріскування металу, що може викликати похибки у прогнозуванні довговічності обладнання. Отримані результати підтверджують важливість врахування реальних конструктивних елементів при моделюванні елементів паророзподільних систем. Це дозволяє підвищити точність інженерних розрахунків і забезпечити більш високу експлуатаційну надійність обладнання в подальшому.

Ключові слова: регулювальний клапан, парове сито, напружено-деформований стан, газодинамічне моделювання.

Постановка проблеми. У сучасній енергетиці забезпечення надійності та ефективності роботи енергетичного обладнання є ключовим завданням. Більшість потреб в електроенергії в Україні покривається атомними електричними станціями (АЕС). Безперебійну роботу та регулювання потужності станції забезпечує паророзподільна система паропроводів та клапанів. Одними з важливих елементів паророзподільної системи АЕС є регулювальні клапани (РК) турбін К-1000-60/3000, більшість яких є основним генеруючим обладнанням атомних електростанцій України. Конструкція РК здійснює кількісне регулювання потоків пари, що забезпечує роботу всієї турбоустановки. Надійність та безпека роботи даного конструктивного елемента має важливе значення. Однак, у практиці експлуатації цього обладнання неодноразово фіксувалися виникнення дефектів металу корпусу

РК, зокрема розтріскування в окремих областях, що суттєво впливає на довговічність, надійність і безпеку роботи. Виявлення причини виникнення таких дефектів доцільно проводити опираючись на сучасні методи математичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Існують різні методики для дослідження процесів, що відбуваються в високотемпературних конструктивних елементах парових турбін. Зазвичай подібного типу задачі вирішуються за допомогою класичних методик, регламентованих в міжнародних або державних стандартах, які засновані на розрахунках граничних умов теплообміну відповідно до вимог нормативних документів, зокрема в Україні згідно з РТМ [1, 2]. На основі підходів викладених в [1, 2] здійснювалося подальше визначення напружено-деформованого стану (НДС) основного металу високотемпературного

обладнання. Проте такий підхід виявився недостатньо точним. У багатьох випадках результати розрахунків не могли пояснити появу дефектів металу, зокрема тріщин, у деяких областях корпусу клапана [3].

Згодом, із розвитком обчислювальної техніки і програмного забезпечення для інженерного аналізу, було запропоновано визначати НДС на основі результатів моделювання газодинамічних процесів у клапані. Використання сучасних систем автоматизованого проектування (САПР) дозволило суттєво підвищити точність розрахунків. Зокрема, в роботах [4, 5] проведено газодинамічне моделювання клапана з подальшим визначенням НДС, що дало змогу отримати значно точніші результати порівняно з попередніми методами. Ці роботи також показали, що врахування реальних умов роботи клапана є ключовим фактором для забезпечення достовірності аналізу.

Однак, через складність конструкції, у більшості досліджень не враховувалася наявність парового сита, яке є важливим елементом конструкції. Парове сито виконує функцію вирівнювання потоків пари, що проходять через клапан, і водночас створює додатковий опір та змінює розподіл тиску і температури в середині пароприймальної камери. Це впливає на температурні градієнти та розподіл напружень у металі корпусу клапана, а ігнорування цього фактора може призводити до суттєвих похибок у результатах моделювання. Наприклад, у роботах [6, 7] показано, що ігнорування впливу додаткових конструктивних елементів може бути основною причиною некоректних результатів та неповного врахування факторів, що впливають на НДС.

Таким чином варто звернути детальну увагу на конструктивні особливості досліджуваного обладнання та їх вплив на газодинамічні процеси.

Постановка завдання. У рамках даного дослідження було проведено детальне моделювання газодинаміки регулювального клапана турбіни К-1000-60/3000 з урахуванням наявності парового сита з метою уточнення його впливу на напружено-деформований стан металу корпусу.

Основні завдання дослідження:

- моделювання газодинамічних процесів у клапані з урахуванням наявності парового сита;
- визначення впливу парового сита на розподіл тисків, швидкостей та температур теплоносія у пароприймальній камері клапана;
- розрахунок напружено-деформованого стану сита та корпусу клапана.

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки для аналізу двофазних потоків і детального розрахунку температурних і напружено-деформованих станів доцільно використовувати спеціалізовані програмні комплекси інженерного аналізу.

Розглянуто тривимірну модель регулювального клапана із врахуванням парового сита, що функціонує у системі паророзподілення турбіни К-1000-60/3000.

Математичну модель газодинамічних процесів, що протікають в регулювальному клапані турбіни К-1000-60/3000, було створено на базі програмного комплексу FloEFD, який забезпечує моделювання багатофазних потоків. Детальний аналіз термо-напруженого стану металу корпусу РК здійснювався з використанням програмного комплексу SolidWorks Simulation.

Газодинаміка клапана врахована на основі рівнянь Нав'є-Стокса для стисливого потоку [9]. У математичну модель також входять закони збереження енергії, маси, імпульсу, рівняння стану рідини або газу, різноманітні замикаючі співвідношення, граничні і початкові умови. Вирішення вищезазначених рівнянь засноване на методі кінцевих об'ємів, який передбачає їх інтегрування за об'ємами комірок розрахункової сітки. Для кожного об'єму розраховуються потоки через його грані (зміна маси, імпульсу, енергії).

Використано алгоритм адаптації скінченно-об'ємної сітки в розрахунковій області в залежності від градієнтів основних параметрів. Варто відмітити, що скінченно-об'ємна сітка розподілилася між комірками в текучому середовищі, в твердому тілі та на границі розділу твердого тіла та текучого середовища: 2,1 млн; 1,2 млн; 1,4 млн відповідно.

За початкові та граничні умови прийнято реальні умови експлуатації клапана, отримані на енергоблоці № 2 Хмельницької АЕС: температура вологої пари $t = 274,3$ °С; тиск пари після парогенератора $P = 6,3$ МПа; ступінь сухості пари $x = 0,995$; витрата пари від усіх парогенераторів $G = 5870$ т/год; шорсткість для досліджуваних труб 10^{-4} м. Також враховувались такі параметри пари, як молярна маса, критичні температура та тиск, коефіцієнт стисливості в критичній точці. Для прогнозування поведінки пари застосовувалось рівняння Редліха-Квонга: двопараметричне рівняння стану реального газу, як покращення рівняння Ван дер Ваальса [11].

Відповідно до залежності в'язкості пари від температури динамічна в'язкість (η) розраховувалась за рівнянням (1):

$$\eta = 1,67 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0,76} \quad (1)$$

Питома теплоємність (C_p) в залежності від температури обчислювалась наступним чином:

$$C_p = 30,092 + 0,006832 \cdot T + (9,081 \cdot 10^{-6}) \cdot T^2 + (1,439 \cdot 10^{-9}) \cdot T^3 \quad (2)$$

Коефіцієнт теплопровідності (λ) розраховувався за допомогою степеневі залежності:

$$\lambda = 0,024 \cdot T^{0,72} \quad (3)$$

При фазовому переході, коли пара конденсується, динамічна в'язкість (η) капель вологи визначалась за рівнянням (4):

$$\eta = 0,0012 \cdot T^{-1} \quad (4)$$

А коефіцієнт теплопровідності для капель вологи розраховувався за наступною залежністю від температури:

$$\lambda = 0,606 \cdot T^{0,5} \quad (5)$$

Тривимірна модель клапана включала основні елементи: корпус, сідло, регулювальний орган і парове сито. Окрему увагу приділили деталізації отворів у ситі, які суттєво впливають на паро-

розподіл. Розрахункова модель представлена на рисунку 1.

Результати моделювання дозволили визначити розподіл швидкостей, тисків і температур по об'єму клапана. Врахування наявності сита при моделюванні суттєво підвищило точність визначення газодинамічних, термодинамічних та механічних процесів в клапані, та дало можливість врахувати нерівномірний розподіл тиску, температури та турбулентність потоків пари, а це, в свою чергу, матиме суттєвий вплив на напружено-деформований стан металу корпусу клапана.

З точки зору газодинаміки, сито створює локальний опір, що викликає значну втрату тиску пари, урахування цього ефекту дає можливість оцінити газодинамічні втрати в клапані (рис. 2, а). Також варто відмітити, що проходження пари через отвори сита сприяє вирівнюванню швидкості потоку після сита, що впливає на подальший рух пари (рис. 2, б). Отвори сита спричиняють утворення локальних турбулентних структур у потоці, які безпосередньо впливають на характер течії, а отже й на гідравлічний опір, тепловіддачу та рівномірність теплообміну.

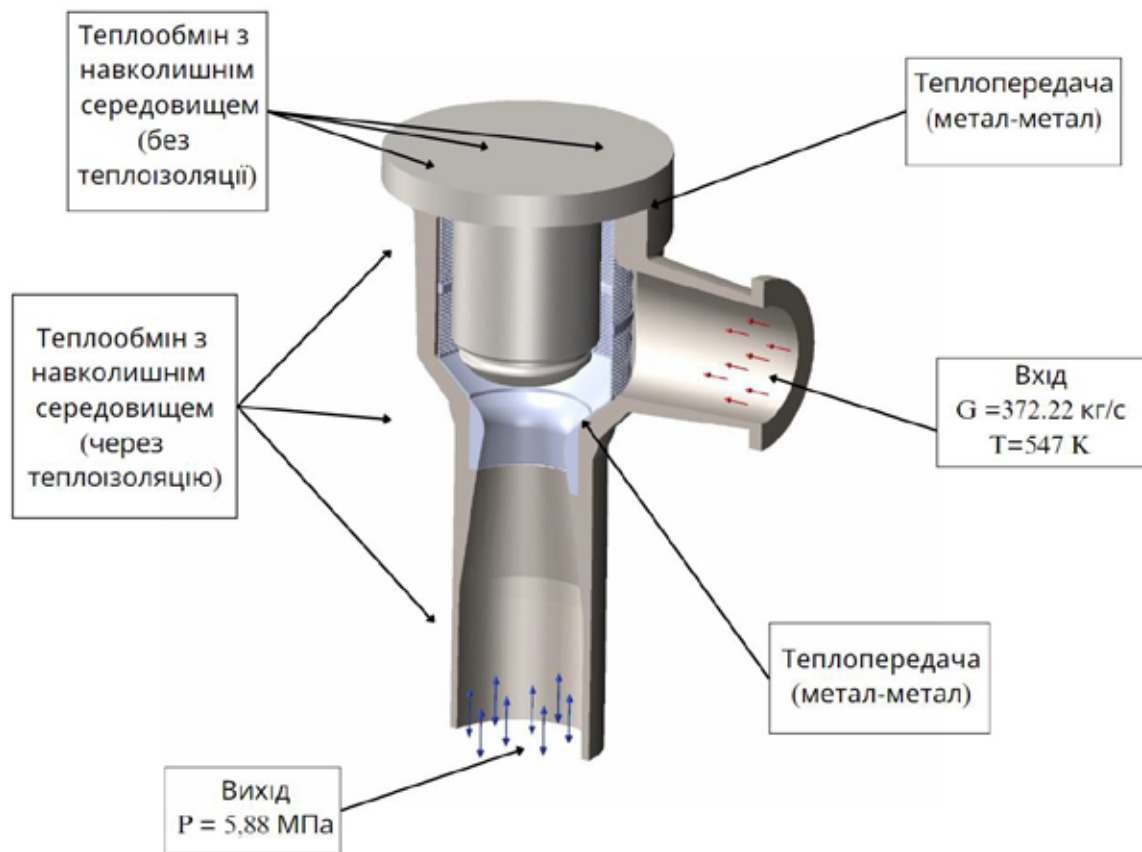


Рис. 1. Розрахункова модель регулювального клапана турбіни К-1000-60/3000

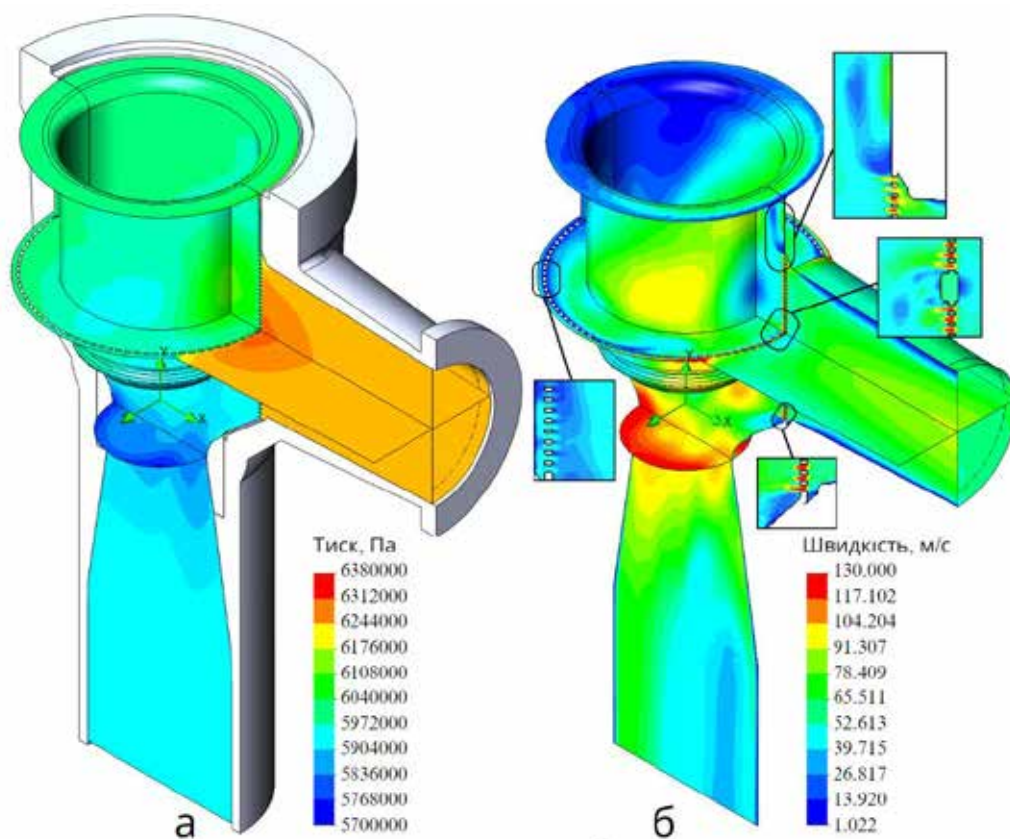


Рис. 2. Результати моделювання газодинаміки: а – розподіл тиску в клапані; б – розподіл швидкостей в клапані

З однієї сторони, сито сприяє вирівнюванню температурного поля пари перед її контактом з штоком та нижньою частиною корпусу клапана. Це впливає на локальні градієнти температури, які важливі для оцінки термічних деформацій металу.

З іншого боку, турбулентність, що утворюється між корпусом клапана та ситом (рис. 3), підвищує коефіцієнт тепловіддачі від пари до металу корпусу клапана. Без урахування цього ефекту можуть бути занижені значення температури металу РК (рис. 4). Нерівномірний теплообмін через неоднорідний розподіл швидкості пари впливає на градієнти температур у металі корпусу, що, як відомо, є основною причиною виникнення термічних напружень. Відмітимо, що сито змінює профіль тиску пари в клапані, його розподіл на стінки корпусу, а це напряму впливає на напружено-деформований стан клапана.

Як видно на рис. 4, розподіл температур в перфорованій частині фільтруючого сита клапана є майже рівномірним ($T = 547$ K). Деяке заохолодження сита (до 536 – 542 K) відбувається в місцях контакту сита з металом корпусу клапана в результаті інтенсифікації теплообміну. Викликають цікавість зони 1 та 2 в яких має місце локальне

підвищення температури металу сита до 548 K, що перевищує температуру теплоносія (пари) на вході в клапан на ~ 2 K. В роботі [10] автор пояснює локальне підвищення температури сита (в 12 °C) на вході до пароприймальної камери клапана тим, що «... під час набігання потоку пари ... на фільтруючому ситі відбувається його гальмування. При цьому відбувається перехід кінетичної енергії потоку пари в теплову».

У випадку, що розглядається в даній статті підвищення температури в зоні 1 на 2 K аналогічне описаному в роботі [10]. Проте локальне підвищення температури, що має місце в зоні 2, на думку авторів, має дещо іншу природу. Аналіз газодинаміки пари показує виникнення значних турбулентних вихорів в задній частині пароприймальної камери (область 2) між фільтруючим ситом та корпусом клапану (рис. 3), де відбувається зіштовхування двох зустрічних потоків пари. Коли два потоки пари з різними швидкостями або напрямками руху зустрічаються, утворюються зони змішування. Відомо, що в таких зонах відбувається інтенсивна дисипація енергії, тобто процес розсіювання кінетичної енергії у вигляді тепла або внутрішньої енергії внаслідок

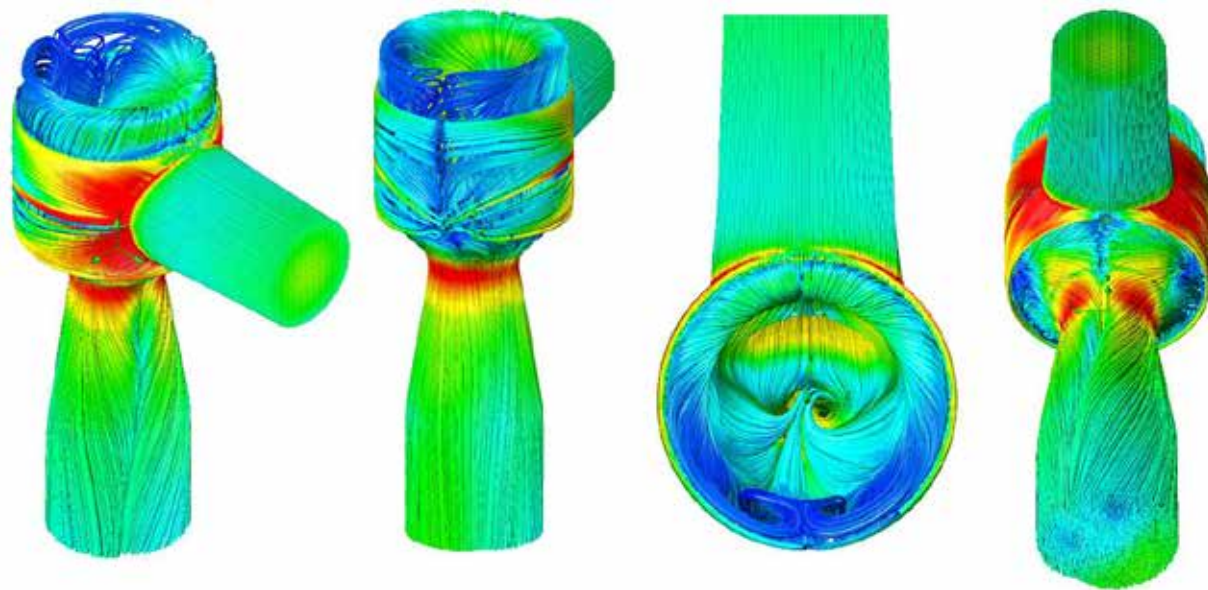


Рис. 3. Лінії потоку пари в клапані

док дії в'язкості, тертя або турбулентності в парі. При русі потоку частинки середовища взаємодіють через внутрішнє тертя (в'язкість), що в свою чергу, призводить до передачі енергії між шарами потоку з різними швидкостями та викликає її перетворення у теплову енергію. Турбулентність інтенсифікує цей процес. При зустрічі потоків утворюється значний градієнт швидкостей, який викликає зсувні напруження. Ці напруження сприяють передачі енергії між шарами пари, що збільшує дисипацію енергії. Наслідком дисипації енергії є локальне підвищення температури, що має місце в зоні 2. Відмітимо також, що описаний вище процес в дещо менших масштабах діє по всій розрахунковій області, що видно по незначному підвищенню температури перфорованої частини фільтруючого сита на 0,5–1 К відносно температури теплоносія (пари) на вході в клапан. Оскільки нерівномірність температур є досить незначною, то її вплив досить слабо прослідковується на світлині розподілу напружено-деформованого стану сита (рис. 5, а).

Отримані результати підтверджують гіпотезу про вплив парового сита на НДС клапана. На рис. 5(б) наведено НДС металу корпусу клапана. Зона розтріскування знаходиться безпосередньо біля області значної дисипації енергії, що виникає внаслідок зіткнення потоків і там, як видно, спостерігаються значні напруження металу корпусу. Таким чином врахування реального розподілу потоку дозволило пояснити виникнення дефектів у металі в зоні розтріскування, що вказана на рисунку 5(б).

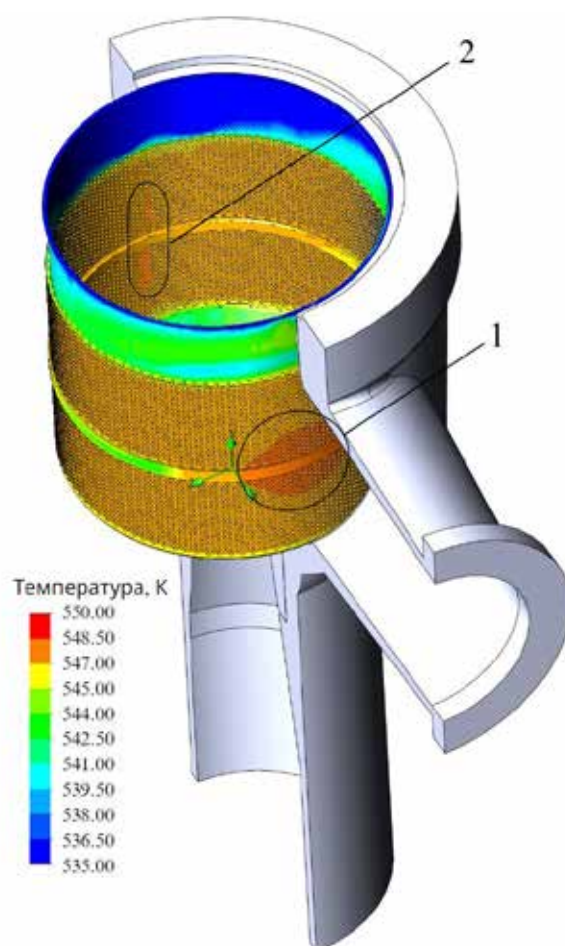


Рис. 4. Розподіл температур по ситу клапана

Висновки. Виконано моделювання газодинамічних процесів у клапані парової турбіни К-1000-60/3000 з урахуванням наявності парового

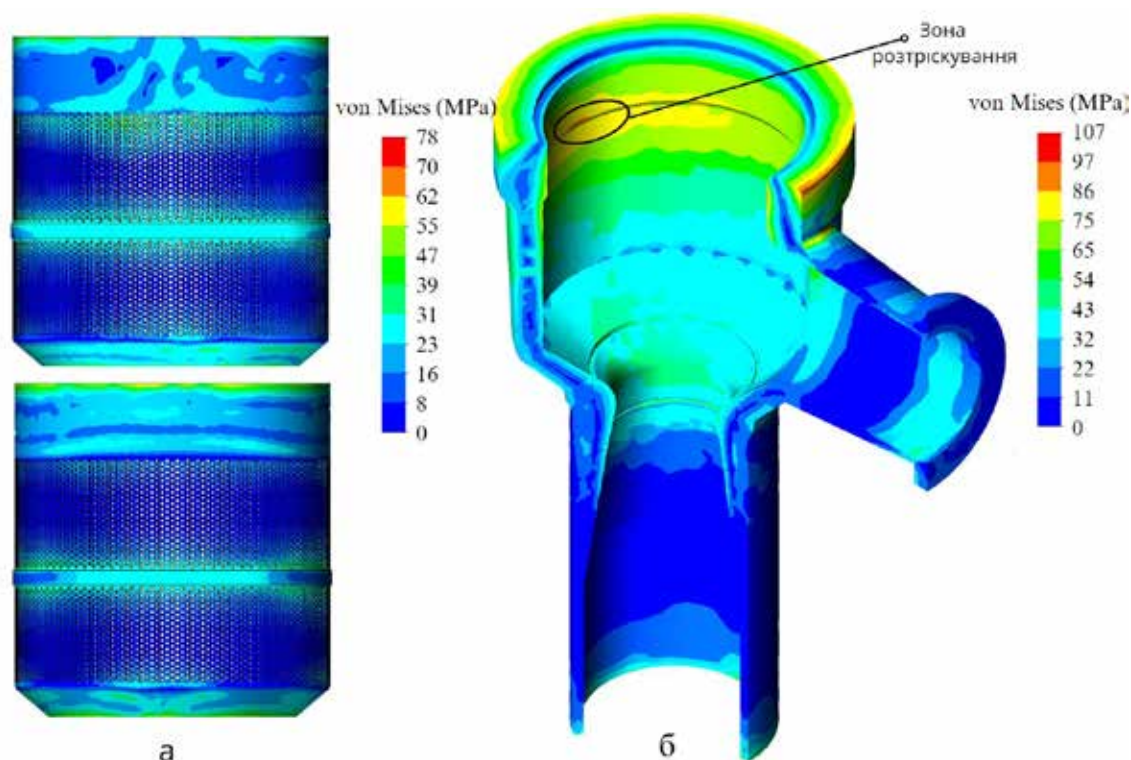


Рис. 5. Результати розрахунків напружено-деформованого стану клапана: а – напружено-деформований стан фільтруючого сита; б – напружено-деформований стан металу корпусу клапана

сита. Встановлено, що парове сито суттєво впливає на газодинамічні процеси, зокрема на розподіл швидкостей, температур і тисків у середині клапана.

Розраховано напружено-деформований стан металу сита та металу корпусу клапана. Проведено аналіз впливу парового сита на напружено-деформований стан регулювального клапана парової турбіни К-1000-60/3000.

Виявлено, що локальні градієнти температури, викликані дисипацією енергії, яка виникла

при зіштовхуванні двох зустрічних потоків пари, є однією з причин підвищення рівня напружень у металі корпусу клапана. Це пояснює утворення мікротріщин, які виявлені під час експлуатації РК, в пароприймальній камері у зонах протилежних паровпуску.

Відзначено, що ігнорування впливу парового сита у процесі моделювання може призводити до суттєвих похибок у подальшому прогнозуванні довговічності конструкції клапана.

Список літератури:

1. РТМ 24.020.16-73. Стационарные паровые турбины. Расчет температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. М., 1973. № ВК-002/3209. 104 с.
2. РД 34.17.440-96. Методические указания щодо порядку проведення робіт з оцінки індивідуального ресурсу парових турбін і продовження терміну їх експлуатації понад парковий ресурс. М., 1996. 98 с.
3. Іванов П. П., Кузнецов М. В. Аналіз причин руйнування клапанів високого тиску. *Теплоенергетика*. 2005. № 5. С. 12–18.
4. Смирнов А. В., Баранов Є. Л. Моделювання газодинаміки клапанів. *Промислова енергетика*. 2010. № 3. С. 45–52.
5. Чернишов Д. І. Сучасні методи розрахунку напружено-деформованого стану енергетичного обладнання. *Вісник машинобудування*. 2015. № 8. С. 28–33.
6. Коваленко О. С., Гринько В. П. Вплив конструктивних елементів на роботу клапанів. *Енергетика України*. 2018. № 4. С. 19–25.
7. Литвиненко Ю. А. Комплексне моделювання клапанів для ТЕС. *Проблеми теплотехніки*. 2021. № 2. С. 34–41.
8. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. *Hemisphere*, 1980. 197 p.
9. Лементар С.Ю Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Моделювання газодинаміки вологої пари в головних паропроводах атомної електростанції. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: технічні науки. 2021. № 5 (32). С. 159-167. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/25>

10. Колядюк А. С. Термоміцність регулюючого клапана парової турбіни : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.09 – динаміка і міцність машин. Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного. Харків, 2021. 168 с.
11. Redlich O., Kwong J. N. S. On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions. *Chemical Reviews*. 1949. Т. 44. № 1. С. 233–244.
12. Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Аналіз підходів до оцінки теплового та напружено-деформованого стану елементів паропроводів АЕС. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. № 30 (69) Частина № 2. С. 12–16.

Rindyuk D.V., Bednarska I.S. INFLUENCE OF STEAM SCREEN ON STRESS-DEFORMED STATE OF CONTROL VALVE

The article investigates the influence of the steam screen on the stress-strain state (SSS) of the K-1000-60/3000 steam turbine control valve, which is an important element of the steam distribution system of nuclear power plants in Ukraine. The reliability and safety of this equipment are critically important, since defects in the metal of the valve body can lead to emergency situations. Modern methods of mathematical modeling were used to analyze gas-dynamic processes and calculate the SS, taking into account the design features of the valve, in particular the steam screen. The modeling was performed using specialized software packages FloEFD and SolidWorks Simulation. Gas-dynamic calculations were performed based on the Navier-Stokes equations for compressible flow, taking into account the laws of conservation of energy, mass and momentum. Taking into account the influence of the steam screen allowed obtaining detailed data on the distribution of pressures, velocities and temperatures inside the valve. The results of the study showed that the steam screen creates local resistance, which significantly affects the uneven distribution of the temperature field and the turbulence of steam flows. The influence of energy dissipation, which is enhanced by the collision of steam flows, on the occurrence of local temperature gradients and stresses, which are one of the reasons for the formation of microcracks in the metal of the valve body, is explained. The analysis demonstrated that ignoring the influence of the steam screen leads to an underestimation of the stress level in the metal cracking zones, which can cause errors in predicting the durability of the equipment. The results obtained confirm the importance of taking into account real structural elements when modeling elements of steam distribution systems. This allows to increase the accuracy of engineering calculations and ensure higher operational reliability of the equipment in the future.

Key words: control valve, steam sieve, stress-strain state, gas-dynamic modeling, operational reliability.

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 667.6, 665.5, 633.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/20>

Андріянова М.В.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Приходько Д.М.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Коваль Д.С.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Ясногор М.В.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Головенко В.О.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Черваков О.В.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

АНТИКОРОЗІЙНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Металеві конструкції є основою багатьох інфраструктурних та інженерних рішень у сучасному світі, охоплюючи будівництво, транспорт, енергетику, машинобудування, а також нафтову та хімічну промисловість. Їх висока міцність, довговічність і здатність витримувати значні навантаження роблять метали незамінними у складних умовах експлуатації. Проте одним із головних викликів, пов'язаних із використанням металів, є їхня схильність до корозії – процесу поступового руйнування під впливом навколишнього середовища. Корозія металів не лише знижує експлуатаційні характеристики конструкцій та створює серйозні економічні збитки, а й проявляється в екологічних аспектах, таких як забруднення ґрунтів і вод.

Ефективним і широко застосовуваним підходом до вирішення проблеми корозії є використання захисних покриттів, які утворюють бар'єр між металевою поверхнею та агресивними зовнішніми чинниками. Серед різноманіття сучасних матеріалів для антикорозійного захисту особливе місце займають епоксифенольні композиції. Вони характеризуються високою адгезією до металевих поверхонь, хімічною стійкістю, термостабільністю та тривалим терміном експлуатації. Завдяки цим властивостям епоксифенольні покриття широко використовуються для захисту металевих конструкцій у морських, хімічно агресивних і високо вологих середовищах.

У даній роботі досліджено фізико-механічні та антикорозійні властивості епоксифенольних композицій, отриманих на основі бутанолізованих продуктів конденсації дифенілолпропану та формальдегіду, модифікованих тригліцидами рослинного походження (БДФО), та епоксидної смоли ЕД-20. Встановлено, що композиції, отримані шляхом суміщення компонентів при нормальних умовах (20°C), здатні утворювати покриття з високим комплексом фізико-механічних властивостей та високою

адгезією до металів. За оцінкою стійкості та терміном слугування покриття на основі розроблених епоксифенольних композицій характеризуються відмінними бар'єрними та антикорозійними властивостями при експлуатації в атмосфері С4 з прогнозованим терміном захисту до 5 років. Встановлено, що нанесення композиції не потребує попередньої спеціальної підготовки металевої поверхні та при цьому утворюється довговічне, міцне і атмосферостійке покриття перспективне для антикорозійного захисту великогабаритних металевих конструкцій.

Ключові слова: епоксифенольні композиції, борвмісні дифенілолпропанформальдегідні олігомери, покриття, антикорозійні властивості.

Постановка проблеми. Антикорозійний захист великогабаритних металевих виробів – головна проблема у рішенні питання забезпечення довговічності металевих конструкцій [1, 2]. Під руйнівним впливом атмосферної дії та агресивних середовищ металеві конструкції поступово втрачають свої первинні властивості та зовнішній вигляд, що значно впливає на їх міцність. Серед основних методів антикорозійного захисту металевих виробів (електрохімічний, фаолітування та ін.), найбільш технологічно та економічно вигідним є застосування лакофарбових матеріалів (ЛФМ) [3]. Цей метод дозволяє обробляти металоконструкції великих габаритів та складної конфігурації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно захист металевих конструкцій при використанні ЛФМ проводять у декілька етапів. Перший – нанесення ґрунтового шару при використанні ґрунтовок, які містять у своєму складі фосфати. Другий – формування поверхневого шару при використанні спеціальних фарб та емалей, у більшості на основі органорозчинних плівкоутворювачів (хлорованого полівінілхлориду та ін.). Такий метод захисту ефективний, але досить трудомісткий та технологічно складний.

У зв'язку з цим найбільш актуальним є ЛФМ, з використанням декількох шарів яких, можливо досягти необхідного рівня захисту від корозії навіть при нанесенні на неочищену (непідготовлену традиційними методами) поверхню. Основним недоліком дотепер розроблених ЛФМ є наявність в їх складі легколетючих органічних сполук, і навіть токсичних речовин (залишків фенолу, тощо). Це обумовлює небезпечність роботи як з вихідними ЛФМ, так і експлуатації покриттів на їх основі [1-3].

Раніше нами було розроблено метод синтезу плівкоутворювачів на основі бутанолізованих продуктів конденсації дифенілолпропану та формальдегіду, модифікованих тригліцеридами рослинного походження (БДФО) [4]. Дифенілолпропан є найбільш екологічно безпечний серед фенолів та надає відповідним олігомерам на його

основі антиоксидантні властивості. Синтезовані плівкоутворювачі значно менш токсичні, ніж традиційні фенольні смоли, що виробляються в Україні. Однак, їх недоліком є твердження при підвищених температурах або протягом тривалого при нормальних умовах (при 20°C).

Постановка завдання. Метою статті є дослідження антикорозійних та фізико-механічних характеристик покриття на основі епоксифенольних композицій, отриманих шляхом суміщення на холоду (при 20°C) БДФО та епоксидної смоли ЕД-20.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження були епоксифенольні композиції, отримані шляхом суміщення при нормальних умовах (при 20-25°C) при різних співвідношеннях БДФО, модифікованого соняшниковою олією, епоксидної смоли ЕД-20 та затверджувача поліетиленполіаміну (ПЕПА).

Синтез плівкоутворювачів на основі бутанолізованих продуктів конденсації дифенілолпропану та формальдегіду, модифікованих тригліцеридами рослинного походження здійснювали за методикою [4].

Термогравіметричний аналіз плівок покриття на основі БДФО та епоксифенольних композицій проводили з використанням приладу TA Instruments TGA Q-50 в інтервалі температур від 20°C до 700°C при швидкості нагріву 5°C/хв.

Епоксифенольні композиції є одними з найбільш перспективних лакофарбових матеріалів, які знаходять широке застосування у промисловості для отримання покриттів спеціального призначення [1, 3]. Головною галуззю їх застосування є антикорозійний захист металевих конструкцій і технологічного устаткування, що експлуатуються в умовах агресивної атмосфери хімічних, нафтопереробних, металообробних виробництв.

Тому такі покриття повинні мати цілу низку цінних властивостей, таких як висока еластичність і адгезійна міцність, термостабільність, універсальна хімічна стійкість. Вирішенню цих питань сприяє застосування в епоксифенольних

композицій найрізноманітніших за своєю структурою і властивостями олігомерів. До складу епоксифенольних композицій входять епоксидні олігомери і фенолформальдегідні олігомери, причому останні в значній мірі визначають властивості одержуваних покриттів.

В процесі роботи було встановлено, що отримані композиції на основі бутанолізованих продуктів конденсації дифенілолпропану та формальдегіду, модифікованих тригліцеридами рослинного походження та епоксидної смоли ЕД-20 при кімнатній температурі здатні формувати плівки покриття з високим комплексом фізико-механічних властивостей (табл. 1) і високою адгезією до металів, в тому числі, до алюмінієвих сплавів.

Виявлено, що змінюючи співвідношення БДФО і епоксидної складової можна суттєво змінювати адгезію, твердість, термостабільність, кислотостійкість, еластичність епоксифенольних композицій.

Для визначення оптимального співвідношення епоксидної смоли ЕД-20 до БДФО, було виготовлено зразки з різним співвідношенням, таким як 5% ЕД-20 : 95% БДФО, 20% ЕД-20 : 80% БДФО, 30% ЕД-20 : 70% БДФО, 50% ЕД-20 : 50% БДФО та проведено дослідження фізико-механічні показників, отриманні значення яких занесені до таблиці 1.

Встановлено, що для всіх композицій характерно збільшення твердості протягом 7 діб. Це обумовлено проходженням процесів затвердіння з формуванням сітчастої структури, що підтверджується зростанням показників гель-фракції (табл. 1).

На основі результатів експериментальних досліджень (табл. 1) можна констатувати, що за показниками твердості і еластичності оптимальне співвідношення компонентів в компози-

ції складає 50% епоксидного олігомеру ЕД-20 і 50% БДФО. При співвідношенні 5%-ЕД-20 до 95%-БДФО суттєвих змін не має, а при співвідношенні 20%-ЕД-20 до 80%-БДФО та 30%-ЕД-20 до 70%-БДФО спостерігається зменшення часу затвердіння, та збільшення твердості покриття, проте найбільшій зміні покриття набуває при співвідношенні 50 на 50.

У рамках даної роботи було здійснено порівняльний аналіз реологічних властивостей БДФО та композицій на основі БДФО та смоли ЕД-20. За даними рис. 1 для вихідного БДФО та композицій на його основі зі смолою ЕД-20 характерна класична для лакофарбових матеріалів псевдопластична течія. Тобто суміщення на холоду епоксидного і фенолоформальдегідного олігомерів призводить до зміни структурної організації суміші олігомерів і зміни розмірів асоціатів. При цьому зі збільшенням терміну зберігання від 24 годин (рис. 1а) до 30 діб (рис. 1в) характер реограм змінюється. Відповідно до яких можна стверджувати, що додавання до БДФО епоксидної смоли ЕД-20 понижує в'язкість лакофарбового матеріалу.

Відповідно даним термогравіметричного аналізу плівкоутворювачі на основі композицій БДФО та епоксидної смоли працездатні при температурах до 175-200°C. При цьому, термостабільність композиції збільшується зі зростанням кількості епоксидної складової.

Встановлено, що поряд з високою термічною стабільністю, покриття на основі епоксифенольних композицій, завдяки особливостям хімічної будови, характеризуються гарними антикорозійними властивостями. Так, було здійснено порівняльну оцінку стійкості та терміну роботи покриттів на вихідного БДФО та епоксифенольних композицій на його основі зі смолою ЕД-20.

Оцінка стійкості та термін працездатності покриттів були оцінені при статичній дії неорга-

Таблиця 1

Фізико-механічні показники епоксифенольних композицій з різним співвідношенням БДФО до ЕД-20

Композиція	Час висихання, год	Твердість, ум.од., через			Еластичність, мм	Гель фракція, через	
		1 добу	3 доби	7 діб		3 доби	7 діб
БДФО	0,5	0,40	0,50	0,60	1	34	46
5% ЕД-20 : 95% БДФО	1	0,38	0,43	0,63	2	36	58
20% ЕД-20 : 80% БДФО	1,2	0,34	0,50	0,65	2	40	60
30% ЕД-20 : 70% БДФО	2	0,38	0,50	0,67	2	40	66
50% ЕД-20 : 50% БДФО	2	0,40	0,60	0,68	3	40	74

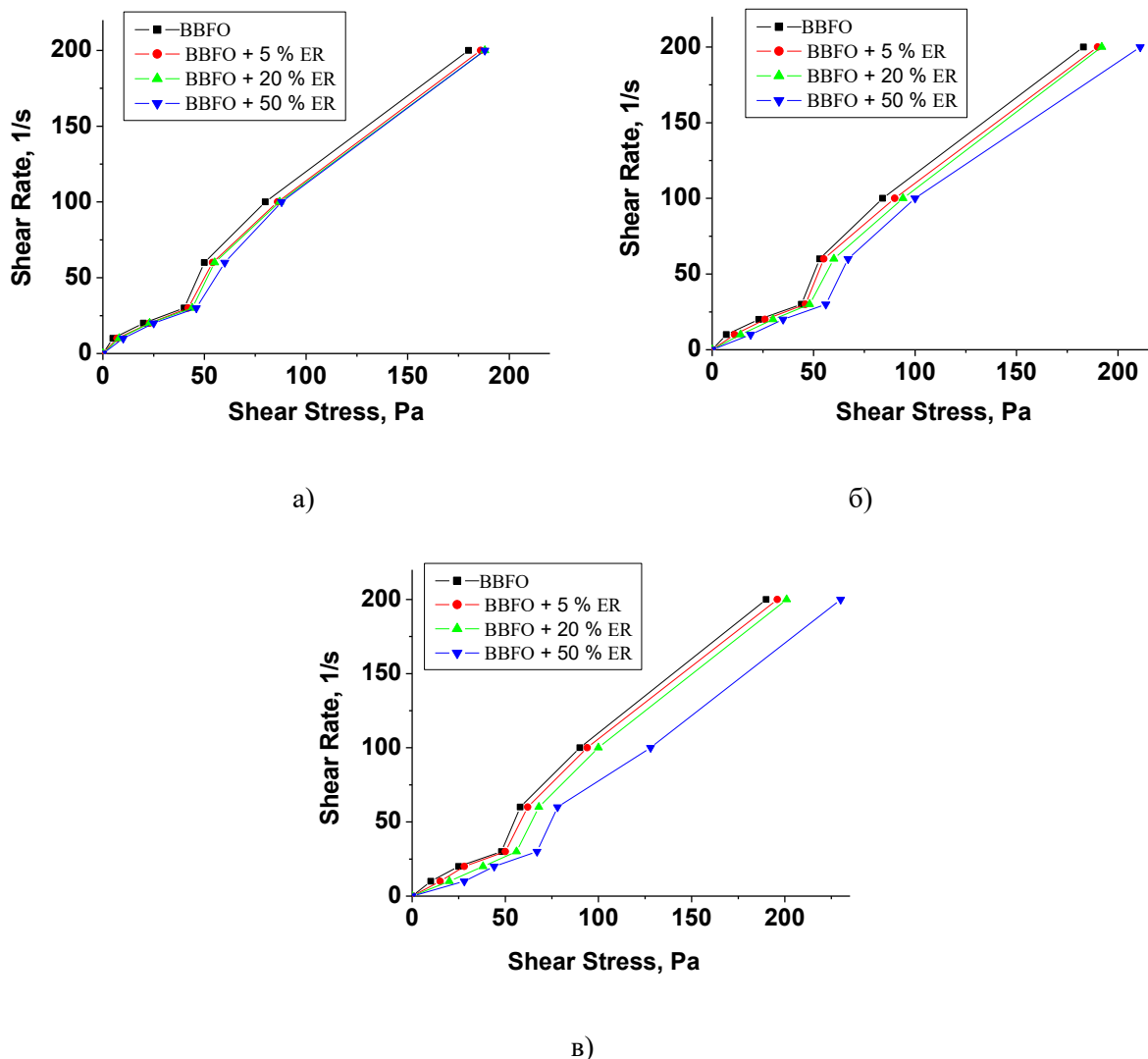


Рис. 1. Реограма смоли БДФО та композицій БДФО з додатковим введенням епоксидної смоли ЕД-20, при зберіганні через 24 години (а), через 15 діб (б), через 30 діб (в) після виготовлення композиції

нічних середовищ (5% розчинів NaOH, H_2SO_4 та NaCl при $20^\circ C$) протягом 72 годин згідно вимог ISO 12944-6:1998, для категорії корозійної активності С4 для промислових зон з узбічною областю помірного засолення та помірного клімату. Результати дослідження представлені на рис. 3 та в таблиці 2 [5].

Встановлено, що при витримці плівок покриттів на основі БДФО та епоксифенольних композицій у 5% сольових розчинах NaCl, проявів підплівкової корозії не спостерігається, що відповідає вимогам ISO 12944-6:1998. В той же час, плівки покриття на основі БДФО та на основі епоксифенольних композицій практично не змінили свій

колір, що підтверджує їх відмінні бар'єрні властивості.

Аналіз отриманих результатів показав, що прогнозований термін служби покриття на основі БДФО, на відміну від покриттів з додаванням відповідної кількості епоксидної смоли, в атмосферних умовах категорії С4 за класифікацією ISO 12944-2:1998 складає 5 років.

Висновки. Розроблені епоксифенольні композиції, що при нормальних умовах ($20^\circ C$) здатні утворювати плівки покриття з високим комплексом фізико-механічних властивостей та високою адгезією до металів, у тому числі і до алюмінієвих сплавів.

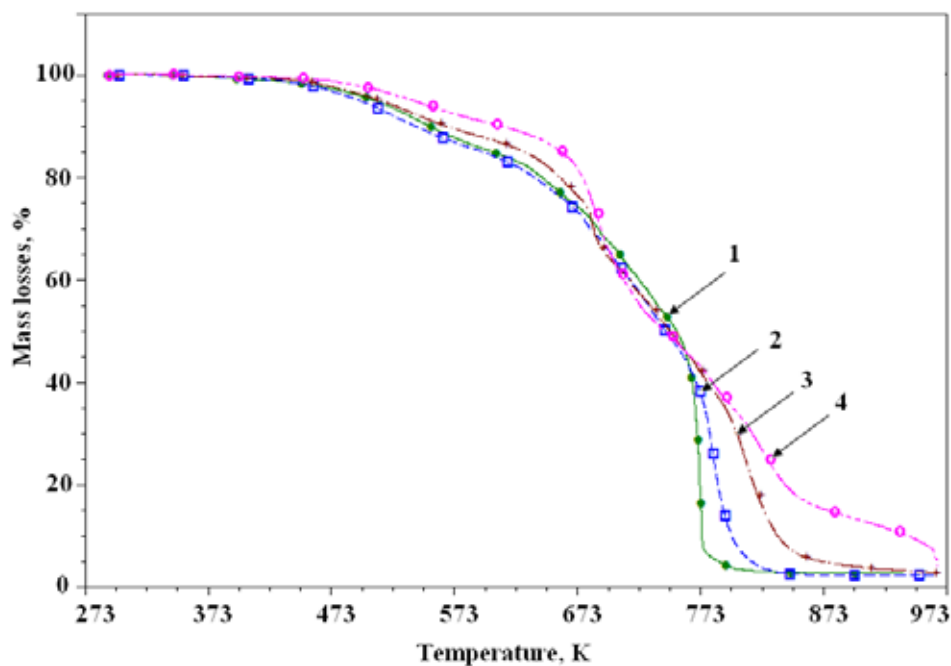


Рис. 2. Дані термогравіметричного аналізу

1 – БДФО; 2 – БДФО + 5% ЭД-20; 3 – БДФО + 20% ЭД-20; 4 – БДФО + 50% ЭД-20



Рис. 3. Зразки з покриттями на основі БДФО (а), композиції БДФО та 5% вмісті епоксидної смоли (б) до та після витримки у 5% розчині NaCl

За оцінкою стійкості та терміном слугування покриття на основі розроблених епоксифенольних композицій характеризуються відмінними бар'єрними та антикорозійними властивостями при експлуатації в атмосфері С4 з прогнозованим терміном захисту до 5 років.

Розроблені епоксифенольні композиції в порівнянні з відомими вітчизняними та зарубіжними більш екологічно чисті та безпечні, що дозволяє рекомендувати їх до практичного застосування у різних галузях промисловості та для вирішення сучасних інженерних і технологічних завдань.

Захисні властивості покриттів

Показник Тип зв'язуючого	Умови дослідження	Адгезія методом решітчастих надрізів за ГОСТ 15140-78, бали		Міцність при ударі за ГОСТ 4765-73, см		Оцінка захисних та декоративних властивостей покриття за ГОСТ 9.407-84
		до	після	до	після	
БДФО	5% водний розчин NaOH, 20°C [6]	1	1	50	50	A31*
	5% водний розчин NaCl, 20°C [6]	1	1	50	50	A31
	5% водний розчин H ₂ SO ₄ , 20°C [6]	1	1	50	50	A31, АД2*
	Підкислений 5% водний розчин CuSO ₄ , 20°C [7]	1	1	50	50	A31
БДФО+5% ЕПС	5% водний розчин NaOH, 20°C	1	2	50	40	A32, АД2
	5% водний розчин NaCl, 20°C	1	1	50	50	A31, АД2
	5% водний розчин H ₂ SO ₄ , 20°C	1	2	50	30	A33, АД2
	Підкислений 5% водний розчин CuSO ₄ , 20°C	1	1	50	40	A31, АД2
БДФО+20% ЕПС	5% водний розчин NaOH, 20°C	1	1	50	40	A31
	5% водний розчин NaCl, 20°C	1	1	50	50	A31
	5% водний розчин H ₂ SO ₄ , 20°C	1	3	50	25	A33, АД2
	Підкислений 5% водний розчин CuSO ₄ , 20°C	1	2	50	40	A32
БДФО+50% ЕПС	5% водний розчин NaOH, 20°C	2	2	40	40	A31
	5% водний розчин NaCl, 20°C	2	2	40	50	A31
	5% водний розчин H ₂ SO ₄ , 20°C	2	3	40	25	A33, АД2
	Підкислений 5% водний розчин CuSO ₄ , 20°C	2	4	40	40	A32

* АЗ – захисні властивості покриттів; АД – декоративні властивості покриттів

Список літератури:

1. Mohd Asim, Naheed Saba, Jawaaid M., Nasir M., Pervaizand M., Othman Y. Alothman. A review on phenolic resin and its composites. *Current Analytical Chemistry*. 2018. № 14 (3). P. 185-195.
2. Yixin Zhao, Rui Xu, Yao Xiao, Hailou Wang, Wei Zhang, Guangyu Zhang. Mechanical performances of phenolic modified epoxy resins at room and high temperatures. *Coatings*. 2022. № 12(5). P. 643-657.
3. Joseph V. Koleske, Michael J. Watkins. Epoxy Resins in Coatings. *15 Paint and Coating Testing Manual*. Philadelphia, 2014. P. 87-93.
4. Suvorova Y.A., Chervakov O.V., Andriianova M.V., Bortnitskiy D.I., Komlyakova O.N. Formation of films of butanolic dyphenyl propane formaldehyde oligomers modified by vegetable oils and animal fats. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2016. № 4. P. 67-72.
5. Manfredi L., Gines M., Benites G. et al. Use of epoxy-phenolic lacquers in food can coatings: Characterization of lacquers and cured films. *Journal of Applied Polymer Science*. 2005. № 6 (95). P. 1448-1458.

Andriianova M.V., Prykhodko D.M., Koval D.S., Yasnohor M.V., Holovenko V.O., Chervakov O.V.
ANTI-CORROSION COATINGS FOR PROTECTION OF METAL STRUCTURES

Metal structures are the basis of many infrastructure and engineering solutions in the modern world, covering construction, transport, energy, mechanical engineering, as well as the oil and chemical industries. Their high strength, durability and ability to withstand significant loads make metals indispensable in difficult operating conditions. However, one of the main challenges associated with the use of metals is their susceptibility to corrosion – the process of gradual destruction under the influence of the environment. Metal corrosion not only reduces the operational characteristics of structures, creates serious economic losses, but also manifests itself in environmental aspects, such as soil and water pollution. An effective and widely used approach to solving the problem of corrosion is the use of protective coatings that form a barrier between the metal surface and aggressive external factors. Among the variety of modern materials for anti-corrosion protection, epoxyphenolic compositions occupy a special place. They are characterized by high adhesion to metal surfaces, chemical resistance, thermal stability and long service life. Due to these properties, epoxyphenolic coatings are widely used to protect metal structures in marine, chemically aggressive and highly humid environments.

In this work, the physicochemical and anticorrosion properties of epoxyphenolic compositions obtained on the basis of butanolized condensation products of diphenylolpropane and formaldehyde, modified with triglycerides of plant origin (BDFO), and epoxy resin ED-20 were investigated. It was established that the compositions obtained by combining the components under normal conditions (20°C) are capable of forming coatings with a high complex of physicochemical properties and high adhesion to metals. According to the assessment of the stability and service life of the coating based on the developed epoxyphenolic compositions, they are characterized by excellent barrier and anti-corrosion properties when operated in a C4 atmosphere with a predicted protection period of up to 5 years. It has been established that the application of the composition does not require prior special preparation of the metal surface and at the same time a durable, strong and weather-resistant coating is formed, promising for anti-corrosion protection of large-sized metal structures.

Key words: epoxyphenolic compositions, boron-containing diphenylolpropaneformaldehyde oligomers, coating, anti-corrosion properties.

Букет О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бутенко О.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНДУКТИВНА СКЛАДОВА ІМПЕДАНСУ ЯК МАРКЕР ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ СТАЛЕВИХ АНОДІВ В МІНЕРАЛЬНІЙ ОЛИВІ

У статті розглянуто виникнення індуктивного зміщення кута фази електрохімічного імпедансу сталі в мінеральній оливі до -15° , що вказує на електрохімічний механізм гетерогенних реакцій при частотах нижче 1 кГц, що призводить до придатності цієї системи як анода амперометричного датчика кисню при температурах вище 50 $^\circ\text{C}$.

Проблематика: Існує проблема інтерпретації ролі індуктивної складової в спектрі електрохімічного імпедансу. Відомо лише, що це пов'язано з рухом іонів в приелектродному шарі електроліту.

Методом є демонстрація можливості застосування амплітудно-фазово-частотних діаграм Боде, а саме виявлення в них індуктивної складової, для експрес-аналізу системи «метал-рідка фаза» на предмет придатності їх для створення електрохімічних сенсорів.

Поляризація синусоїдальною напругою з подальшим аналізом спектрів електрохімічного імпедансу успішно застосовується для дослідження слабоелектропровідних середовищ, оскільки її простіше реалізувати, ніж метод поляризаційних кривих, а результати отримують на порядки швидше, ніж у випадку гравіметрії. Проблема становить лише інтерпретація одержаних даних. У роботі розкрито роль індуктивної складової імпедансу як маркера наявності електрохімічного механізму електродних процесів у системі «сталь-неводне середовище», також доведено наявність електрохімічної корозії сталі в мінеральній оливі й показано, що її роль росте з підвищенням температури відповідно росту впливу індуктивного зміщення зсуву кута фази електрохімічного імпедансу.

Методологія. В роботі використано метод спектроскопія електрохімічного імпедансу з аналізом отриманих даних переважно у вигляді фазочастотної складової діаграми Боде.

Оригінальність. Новизна роботи полягає в пропозиції використовувати виявлене індуктивне зміщення фазового кута імпедансу як маркер наявності електрохімічного механізму перебігу реакцій в неводних розчинах. Практична цінність. Використання діаграм Боде істотно спрощує і скорочує тривалість детектування електрохімічного механізму на декілька порядків і відкриває нові вектори досліджень можливості перебігу електрохімічних процесів і підбору в тому числі електродних матеріалів.

Ключові слова: електрохімічна корозія, електрохімічний імпеданс, діаграма Боде, індуктивне зміщення кута фази, амперометричний сенсор.

Постановка проблеми. Існує проблема інтерпретації ролі індуктивної складової в спектрі електрохімічного імпедансу. Відомо лише, що це пов'язано з рухом іонів в приелектродному шарі електроліту.

Мета. Методом є демонстрація можливості застосування амплітудно-фазово-частотних діаграм Боде, а саме виявлення в них індуктивної складової, для експрес-аналізу системи «метал-рідка фаза» на предмет придатності їх для створення електрохімічних сенсорів.

Поляризація синусоїдальною напругою з подальшим аналізом спектрів електрохіміч-

ного імпедансу успішно застосовується для дослідження слабоелектропровідних середовищ, оскільки її простіше реалізувати, ніж метод поляризаційних кривих, а результати отримують на порядки швидше, ніж у випадку гравіметрії. Проблема становить лише інтерпретація одержаних даних. У роботі розкрито роль індуктивної складової імпедансу як маркера наявності електрохімічного механізму електродних процесів у системі «сталь-неводне середовище», доведено наявність електрохімічної корозії сталі в мінеральній оливі й показано, що її роль росте з підвищенням температури відповідно росту впливу індуктивного

зміщення зсуву кута фази електрохімічного імпедансу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Неводні розчини набувають все більшого поширення в хімічній технології [1]. Одним з їх недоліків з точки зору технічної електрохімії є принципово нижча електропровідність [2] порівняно з водними розчинами, наслідком чого є пропорційне сповільнення електрохімічних реакцій. Відповідно, дослідження корозійних або інших анодних процесів, наприклад, в мінеральних оливах ускладнюється на стільки, що пряме визначення електрохімічної складової традиційними методами поляризаційних кривих або гравіметрією унеможлиблюється або суттєво ускладнюється. Тому важливим є відпрацювання застосування більш сучасних методів досліджень, як вимірювання спектрів імпедансу. Імпедансметрію слабоеклектропровідних середовищ організувати й провести незрівнянно простіше [3], ніж метод поляризаційних кривих, а результати будуть одержані на багато порядків швидше ніж у випадку гравіметрії. При цьому, відкритою лишається проблема інтерпретації одержаних результатів [4, 5], варіант вирішення якої подано у даній роботі.

Показано спробу застосувати поляризацію синусоїдальною напругою з подальшим аналізом спектрів електрохімічного імпедансу на предмет потенційної придатності системи «сталь-мінеральна олива» для застосування як витратного анода малопотужної електрохімічної системи сенсора кисню. Такий сенсор буде мати свою, ще незайняту, ринкову нішу експлуатації за температур від 50 до 250 °С, як раз між областями застосування сенсорів на основі водних розчинів (до 50 °С [6-8]) і сенсорів на основі високотемпературних твердих електролітів (вище 300 °С [9-11]).

Постановка завдання. Метою є демонстрація можливості застосування амплітудно-частотних діаграм Бode, а саме виявлення в них індуктивної складової, для експрес-аналізу систем «метал-рідка фаза» на предмет придатності їх для створення електрохімічних сенсорів.

Досягнення поставленої мети реалізується зняттям спектру електрохімічного імпедансу найдоступніших електродного матеріалу й неводного рідкого середовища (сталь 08кп і мінеральна олива) за близьких до стандартних і підвищених температур та аналізом одержаних амплітудно-частотних характеристик (діаграм Бode).

Виклад основного матеріалу. Досліди проводили занурюючи два плоских електрода зі сталі 08кп розміром 20×15×0.1 мм у відкритий стакан

з моторною оливою, який термостатували на водяній бані. Електроди розміщені паралельно вздовж більшого розміру на відстані 0.1 мм один від одного. Міжелектродна відстань задана двома фторопластовими розділювачами шириною 1 мм. Електродна пара загалом фіксувалася фторопластовими джгутами. Струмівідводи є продовженням електродів й виготовлені разом з ними з одної цільної смужки сталі задля уникнення проблем з додатковими електродними парами, що можуть виникнути у місцях електричних контактів. Вимірювання проводили імпедансметром VersaSTAT 3 АМТЕК за найвищої можливої амплітуди коливань напруги в 1 В для одержання максимально можливого струмового відгуку, з огляду на високий омичний опір досліджуваної системи.

Система двох сталевих електродів розділених масляним фактично ізолятором демонструє очікувано великий активний і реактивний опір (рис. 1). За частот вище 100 кГц відтворюваність модуля комплексного опору є хорошою, що є очевидним для електропровідності плоского конденсатора [12-15]. А от за нижчих частот помітним стає вплив нехарактерної для плоского конденсатора складової зі значними випадковими відхиленнями.

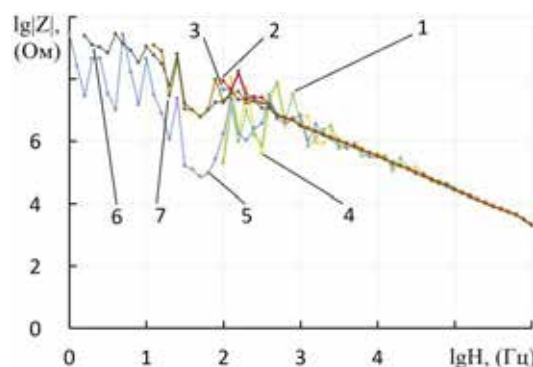


Рис. 1. Діаграма Бode для системи двох електродів із сталі 08кп в моторній оливі свіжій (1-3) і відпрацьованій (4-7) за температури 20 °С. Тривалість від початку занурення електродів в оливу: 1, 4 – через 2...5 хв; 2, 5 – через 10 хв; 3, 6 – через 20 хв; 7 – через 30 хв.

Відомо, що поляризаційний опір електрохімічних реакцій суттєво впливає на загальний опір протікання струму в електрохімічних системах за частот нижче 1...10 кГц [16, 17]. З рис. 1 видно, що у діапазоні 0.03...10 кГц спостерігається зниження модуля комплексного опору явно за рахунок додаткової (окрім реактивного опору конденсатора) складової провідності, яка відтворюється

з помітними випадковими похибками. Однозначно записати цю складову на рахунок електрохімічного механізму без спеціальних пояснень не дозволяє факт зростання загального комплексного опору при подальшому зниженні частоти у діапазоні 1...30 Гц при значних випадкових відхиленнях імпедансу, хоча в електрохімічних системах з водним розчином електроліту в цьому діапазоні частот має спостерігатися практично незмінне з частотою й добре відтворюване значення комплексного опору [15, 18, 19].

Більш-менш корельовані результати при частотах нижче 100 Гц одержані на відпрацьованій оливі (криві 4-7, рис. 1). За цих частот величина випадкових відхилень у свіжій оливі на стільки зростає, що результати неможливо показати на рис. 1 для кривих 1-3, інакше рисунок буде засмічений хаотичними зигзагами до повної його нечитабельності. Принципова відмінність цих двох застосованих рідких фаз у контексті даної роботи полягає в значно вищій концентрації потенційних деполіаризаторів (спричиняють утворення іонів) і лігандів (сприяють утворенню іонів) у відпрацьованій оливі порівняно зі свіжою внаслідок тривалих процесів крекінгу й окиснення. З цього можна зробити припущення, що за температури 20 °C збільшення тривалості катодних і анодних півперіодів поляризації сталі, відповідне частотам нижче 1 кГц, супроводжується на стільки значним і необоротним споживанням деполіаризаторів та лігандів, що за високої в'язкості середовища їх стає недостатньо для забезпечення певного рівня провідності, необхідної для електрохімічного механізму.

Загалом, причиною просідання імпедансу за частот 30...100 Гц у відпрацьованій оливі можна у першому наближенні назвати електрохімічні реакції, яким потенційно вже вистачає часу півперіодів коливань з частотою нижче 1 кГц для необоротного перебігу. Відповідно, їх необоротність за умови низького вмісту деполіаризаторів і лігандів стає причиною їх припинення при подовженні півперіодів коливань з частотою нижче 30 Гц, внаслідок чого електрохімічна складова виключається з процесу проведення струму, а комплексний опір росте й повертається до залежності більш характерної для плоского конденсатора.

Рис. 1 містить також деякі дані хронологічного змісту, а саме чітко видиме зниження величини випадкових відхилень по мірі подовження тривалості витримки електродів в оливі. Так найбільші відхилення у свіжій та відпрацьованій оливі спостерігаються практично одразу після занурення

електродів (відповідно криві 1 і 4 на рис. 1), та зводяться практично нанівель за півгодини витримки в оливі (відповідно криві 3 та 6, 7 на рис. 1). Вірогідною причиною є конкурентна адсорбція компонентів повітряного середовища (сорбувалися до занурення) і компонентів оливи, що зумовлює в подальших дослідженнях враховувати цей фактор.

У контексті дослідження малоелектропровідних середовищ більш чутливими є зміщення кута фази імпедансу. На рис. 2 як раз подано фазово-частотну складову діаграми Бode, з якої краще видно результати конкурентної адсорбції згаданої вище. Очевидно, що стабільні значення близько -90° є однозначним маркером ємнісного ефекту. Тобто, в діапазоні частот від 1 кГц і вище два дослідні електроди в моторній оливі ведуть себе як плоский конденсатор, що є очікуваним і вповні адекватним результатом [15, 16, 20]. За частот нижче 1 кГц, коли тривалість півперіоду поляризації стає достатньою для виходу іонів заліза з металу та їх переміщення на відчутну для електрохімічного механізму відстань, спостерігається різке зростання випадкових відхилень, припущення щодо природи яких вже було зроблене вище. Звертають на себе увагу відхилення кривої 1 на рис. 2, які є помітними навіть при високих частотах, що підтверджує хронологічну тенденцію щодо конкурентної адсорбції та стабілізації стану поверхні електродів з часом. Тобто, результати амплітудно-частотно-фазового аналізу з рис. 1 і рис. 2 вказують на потребу витримувати електроди в маслі перед кожним дослідом близько 30 хв для одержання адекватних результатів.

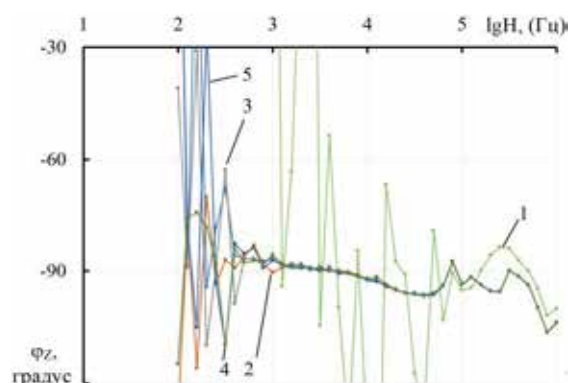


Рис. 2. Вплив тривалості занурення електродів із сталі 08кп у свіжу оливу на фазово-частотну характеристику імпедансу при 20 °C: 1 – через 2...5 хв після занурення; 2 – через 10 хв; 3 – через 15 хв; 4 – через 20 хв; 5 – через 25 хв

Адсорбційні, дифузійні й міграційні процеси очікувано прискорюються з підвищенням темпе-

ратури, що ілюструє рис. 3 для 50 °С: одразу після занурення електродів у свіжу оливу (крива 1, рис. 3) за частот вище 1кГц (в умовах відсутності електрохімічних процесів) результати вимірювань добре відтворюються.

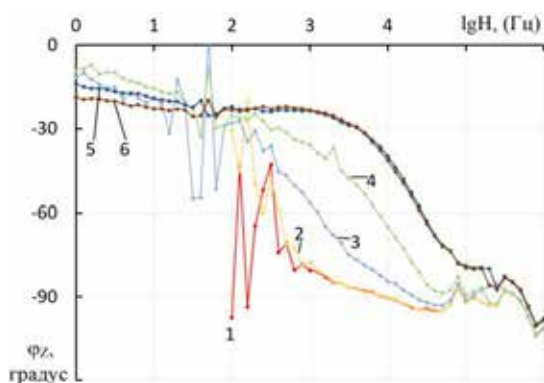


Рис. 3. Вплив індуктивної складової імпедансу системи двох електродів зі сталі 08кп у свіжій моторній оливі при 50 °С на хід фазово-частотних характеристик: 1 – через 2...5 хв після занурення електродів в оливу; 2 – через 10 хв; 3 – через 15 хв; 4 – через 20 хв; 5 – через 25 хв; 6 – через 30 хв.

Тривалість витримки електродів в оливі впливає за цих умов на зміщення кута фази імпедансу, який при зниженні частоти до 10...100 кГц і нижче стає відчутно позитивнішим й сягає стабільних значень близько -15° . Оскільки електротехнічні еквівалентні моделі реальних електрохімічних систем є загальноприйнятими [4, 15], то можна стверджувати, що підвищення температури на 30 °С призвело до підключення індуктивної складової реактивного опору, яка сама по собі зміщує кут фази на $+90^\circ$, а за умов взаємодії з ємнісною складовою (її характерний кут зміщення -90° буде прагнути зсунути кут фази до нуля).

Чим довше витримка електродів в оливі, тим ближче криві залежності зміщення кута фази на рис. 3 наближаються до нуля, що каже на зростання ролі індуктивної складової з часом. Оскільки на сьогодні індуктивну складову у даному контексті інтерпретують як результат гальмування руху іонів у рідкій фазі пор електродів [21], то зміщення кута фази імпедансу від ємнісних -90° ближче до нуля зі збільшенням температури, тривалості контакту електродів з оливою та зниженням частоти можна пояснити ростом кількості іонів та довжини шляху їх переміщення, що все разом вказує на збільшення ролі електрохімічного механізму електродних процесів.

Провели порівняння фазово-частотних характеристик імпедансу сталевих електродів у свіжій

та відпрацьованій оливі за температури 50 °С (рис. 4). Цікаво, що стабільшу фазово-частотну характеристику демонструє тільки система на свіжій оливі (крива 1, рис. 4).

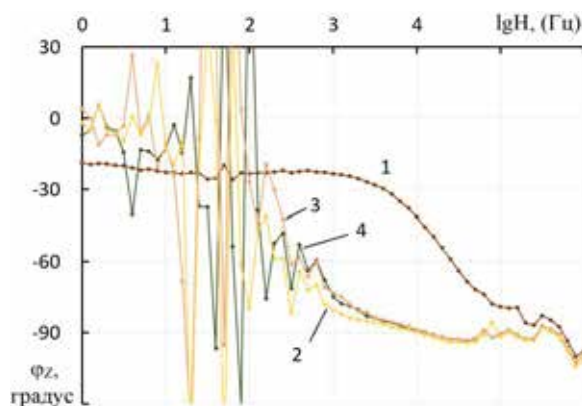


Рис. 4. Порівняння зміщення фази імпедансу електродів зі сталі 08кп у свіжій (1) і відпрацьованій (2-4) оливі за температури 50 °С: 1, 4 – через 35 хв перебування в оливі; 2, 3 – відповідно через 15 і 25 хв.

У відпрацьованій оливі, за умов можливого перебігу електрохімічних реакцій при частотах нижче 1 кГц, спостерігається ріст випадкових відхилень (криві 2-4) при тому, що хронологія зняття цих кривих (від 15 до 35 хв від занурення) та їх хід дозволяють стверджувати цілковиту стабілізацію процесів, пов'язаних з переходом сталевих електродів із повітря в оливу. Зважаючи, що кут фази для відпрацьованої оливи зміщується при частоті 1 Гц аж до нуля, можна однозначно стверджувати, що відповідні електродні процеси перебігають за електрохімічним механізмом. Вірогідно деяке збільшення їх швидкості порівняно зі свіжою оливою веде до появи електрохімічних шумів, аналогічних таким, що виникають в електрохімічних системах з водним розчином електролітів внаслідок нестационарних і стохастичних процесів в умовах виникнення й підтримання пасивного стану [22].

Можна дати ще простіше й достовірніше пояснення більшим стохастичним відхиленням на рис. 4 для відпрацьованої оливи порівняно зі свіжою. Зміщення кута фази для першої майже до нуля при аналогічному зміщенні для другої лише до -15° вказує на більшу кількість іонів у відпрацьованій оливі, що очевидно має сприяти більшій швидкості електрохімічних реакцій, яка за умови переміщення іонів на більшу відстань зумовлює ріст тривалості перехідних процесів. Раніше проведені роботи авторів статті показали [23-26], що тривалість перехідних процесів відтворю-

ється суттєво гірше стаціонарних характеристик електрохімічних систем. Враховуючи, що вимірювання імпедансу на певній частоті вимагає проходження певного числа періодів коливань, усереднене виміряне значення кожного разу відповідатиме таким станам приелектродного шару, які не вкладаються в одну монотонну функціональну залежність від часу, що й зумовлює зображені на рис. 4 відхилення.

Висновки. Одержані на парі сталевих електродів у моторній оливі амплітудно-фазово-частотні характеристики Боде показали наявність суттєвої електрохімічної складової електродних процесів, пов'язаних з корозією, що дозволяє сподіватися на перспективу розробки малопотужних електрохімічних систем (як сенсори кисню) з дешевими сталевими електродами у масляному розчині.

Електрохімічний механізм корозії доведено за характерним для індуктивної складової позитивним зміщенням кута фази імпедансу від типових для ємності -90° до компромісного між ємністю й індуктивністю нуля у випадку відпрацьованої оливи, або до -15° – у випадку оливи свіжої.

Перехід від свіжої оливи до відпрацьованої (збільшення концентрації іонів у рідкій фазі), підвищення температури та зниження частоти коливань напруги поляризації (подовження шляху міграції іонів) сприяють росту індуктивної складової, сліди впливу якої проявляються вже за частот нижче 10...100 кГц й стабілізують зміщення кута фази імпедансу ближче до нуля за частот нижче 1 кГц, що відповідає частотам появи поляризаційного опору електрохімічних реакцій як активної складової імпедансу.

Список літератури:

1. Barthel J., Gores Heiner-J., Schmeer G., Wachter R. Non-aqueous electrolyte solutions in chemistry and modern technology Topics in Current Chemistry – Springer, Berlin; Heidelberg, New York: 1983. – V.III – P.33-143.
2. Lyklema J. Principles of interactions in non-aqueous electrolyte solution Current Opinion in Colloid & Interface Science. – 18. – 2013. – P. 116–128.
3. Macdonald J., Macdonald J.R., Garber J. A. Analysis of Impedance and Admittance Data for Solids and Liquids Journal of The Electrochemical Society. – Vol. 124. – No. 7. – 1977. – P. 1022-1030.
4. Lasia A. Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications Modern Aspects of Electrochemistry red.: B. E. Conway, J. Bockris, R.E. White, Edts. Kluwer Academic Plenum Publishers: New York, 1999. Vol. 32. – P. 143-248.
5. Harrington D.A. Electrochemical Impedance Spectroscopy. – Trondheim: NTNU, 2004. 66 p.
6. Cämmerer M., Mayer Th., Penzel St., Rudolph M., Borsdorf H. Application of Low-Cost Electrochemical Sensors to Aqueous Systems to Allow Automated Determination of NH₃ and H₂S in Water Sensors. 2020. – 20. – P. 2814 – 2829.
7. Букет О., Лінючева О., Нагорний О., Лінючов О. Електрохімічний сенсор хлору на основі галогенідного електроліту з медіатором для аварійних викидів Т. 6. – Випуск 6. – 2014. С. 42-47.
8. T.S. Munonde, Ph.N. Nomngongo. Nanocomposites for Electrochemical Sensors and Their Applications on the Detection of Trace Metals in Environmental Water Samples Sensors. 2021. – 21. – P. 131 – 158.
9. Ghosh A., Zhang C., Shi S.Q., Zhang H. High-Temperature Gas Sensors for Harsh Environment Applications CLEAN Soil Air Water. 2019. p 47. -1800491.
10. Gorbova E., Tzorbatozoglou F., Molochas C., Chloros D., Demin A., Tsiakaras P. Fundamentals and Principles of Solid-State Electrochemical Sensors for High Temperature Gas Detection Catalysts. – 2022. – 12. – P. 1-33.
11. Zhuiykov S., Ono T., Yamazoe N., Miura N. High-temperature NO_x sensors using zirconia solid electrolyte and zinc-family oxide sensing electrode Solid State Ionics. 152 – 153. 2002. P. 801 – 807.
12. K. Tamizh Selvi, K. Alamelu Mangai, M. Priya, S. Sagadevan. Investigation of the dielectric and impedance properties of ZnO MgO nanocomposite Physica B: Physics of Condensed Matter. 594. 2020. 412355.
13. Amalendu Chandraa, Biman Bagchi. Frequency dependence of ionic conductivity of electrolyte solutions Chinese Journal of Chemical Physics. – January, 2000. – P. 1876-1888.
14. Sayers B. Impedance Spectroscopy—Theory, Experiment, and Applications chef-edit. E. Barsoukov, J.R. Macdonald (Eds.). – New York, NY: Wiley Inter-science, 2005. – P. 356–357.
15. J. Kang, J. Wen, Sh.H. Jayaram, A. Yu, X. Wang. Development of an equivalent circuit model for electrochemical double layer capacitors (EDLCs) with distinct electrolytes Electrochimica Acta. – 115. – 2014. – P. 587–598.
16. K.R. Cooper, M. Smith. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement Journal of Power Sources. – 160. – 2006. – P. 1088–1095. 17. H.P. Hack, P.J. Moran, J.R. Scully, in: L.L. Scribner, S.R. Taylor (Eds.), The Measurement and Correction of Electrolyte Resistance in Electrochemical Tests-ASTM STP 1056 American Society for Testing and Materials. – Philadelphia, PA. – 1990. – P. 5–26.

18. S. Pruneanu, A. Boughriet, A. Henderson, C. Malins, Z. Ali, L. Olenic. Impedimetric Measurements for Monitoring Avidin-Biotin Interaction on Self-Assembled Monolayer Particulate Science and Technology. – V.26. – Iss. 2. – 2008. – P. 136-144.
19. K. P. Radha, P. Mahalakshmi, S. Chitra. Magnitude Bode Plot Analysis of Solid Polymer Electrolyte PMMA Complexed with Adipic Acid Der Pharma Chemica – 2016. – 8(11). – P. 222-226.
20. G. S. Lakshmi, Rubanenko O., Rubanenko O., Labzun M. Dielectric Properties Analysis of Paper Capacitor AIP Conference Proceedings. – 2269. – 2020. – 030020.
21. K. Ariyoshi, A. Mineshige, M. Takeno, T. Fukutsuka, T. Abe, S. Uchida, Z. Siroma. Electrochemical Impedance Spectroscopy Part 2 Electrochemistry (The Electrochemical Society of Japan). – 90(10). – 102008. – 2022. – p. 1-16.
22. Buket, O.I., Linyucheva, O.V., Bludenko, A.V., Nahornyi, O.V. Influence of corrosion on the effective resistance of Amperometric sensor Materials Science. – Volume 50. – Issue 5. – 2014. – P. 81-86.
23. Букет О.І., Лінючева О.В., Кушмирук А.І. Вплив адсорбції визначуваного компоненту на час перехідних процесів в амперометричних газових сенсорах Наукові вісті НТУУ "КПІ" – 2009, № 3, С. 131-137.
24. Букет О.І., Лінючева О.В., Ващенко О.М., Татарченко Г.О. Вплив поляризації допоміжного електрода на час перехідних процесів в амперометричних газових сенсорах Наукові вісті НТУУ "КПІ" – 2010, № 3. С. 94-99.
25. Букет О.І., Лінючева О.В., Блуденко А.В., Нагорний О.В., Лінючев О.Г. Вплив електроосмотичних явищ на час перехідних процесів у амперометричних газових сенсорах Наукові вісті НТУУ «КПІ» – 2013, № 6(92). – С. 83-88.
26. Букет О.І. Вплив надповільної корозії на тривалість перехідних процесів в амперометричних газових сенсорах Наукові вісті НТУУ "КПІ" – 2015, № 3. – с. 23-26.

Buket O.I., Butenko O.S. INDUCTIVE COMPONENT OF IMPEDANCE AS A MARKER OF ELECTROCHEMICAL CORROSION OF STEEL ANODES IN MINERAL OIL

The article considers the occurrence of an inductive phase angle shift of the electrochemical impedance of steel in mineral oil up to -15° , which indicates the electrochemical mechanism of heterogeneous reactions at frequencies below 1 kHz, which leads to the suitability of this system as an anode of an amperometric oxygen sensor at temperatures above 50°C .

Problem: *There is a problem of interpreting the role of the inductive component in the electrochemical impedance spectrum. It is only known that this is associated with the movement of ions in the near-electrode layer of the electrolyte.*

The method is to demonstrate the possibility of using amplitude-phase-frequency Bode diagrams, namely, the detection of an inductive component in them, for express analysis of the "metal-liquid phase" system for their suitability for creating electrochemical sensors.

Sinusoidal voltage polarization with subsequent analysis of electrochemical impedance spectra is successfully used to study weakly conductive media, since it is easier to implement than the polarization curve method, and the results are obtained orders of magnitude faster than in the case of gravimetry. The only problem is the interpretation of the obtained data. The paper reveals the role of the inductive component of impedance as a marker of the presence of an electrochemical mechanism of electrode processes in the "steel-non-aqueous medium" system, the presence of electrochemical corrosion of steel in mineral oil is also proven and it is shown that its role increases with increasing temperature in accordance with the increase in the influence of the inductive displacement of the phase angle of the electrochemical impedance.

Methodology. *The paper uses the electrochemical impedance spectroscopy method with the analysis of the obtained data mainly in the form of the phase-frequency component of the Bode diagram.*

Originality. *The novelty of the work lies in the proposal to use the detected inductive phase angle shift of the impedance as a marker of the presence of an electrochemical mechanism of the course of reactions in non-aqueous solutions. Practical value. The use of Bode diagrams significantly simplifies and reduces the duration of detecting the electrochemical mechanism by several orders of magnitude and opens up new vectors for research into the possibility of the course of electrochemical processes and the selection of electrode materials, including.*

Key words: *electrochemical corrosion, electrochemical impedance, Bode diagram, inductive phase angle shift, amperometric sensor.*

Дудка М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воробйова В.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КВАНТОВО-ХІМІЧНА ОЦІНКА АНТИОКСИДАНТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОСНОВНИХ СПОЛУК ХМЕЛЮ (*HUMULUS LUPULUS*): ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ДІЇ

Антиоксидантні властивості сполук, виділених із шишок хмелю (*Humulus lupulus*), обумовлюють їхню перспективність у фармацевтичній, харчовій та косметичній промисловості. У рамках даного дослідження проведено квантово-хімічний аналіз ключових біологічно активних речовин хмелю, таких як флавоноїди (ксантохумол, катехін), ефірні олії (β -каріофілен, α -гумулен), а також альфа- і бета-кислоти (гумулон, лупулон). Розрахунки здійснювались за допомогою теорії функціоналу густини (DFT) для визначення енергетичних параметрів молекул, таких як енергія найвищої зайнятої молекулярної орбіталі, найнижчої вакантної молекулярної орбіталі, потенціал іонізації, жорсткість, електрофільність, нуклеофільність та різниця енергій між ВЗМО та НВМО (ΔE). Результати дослідження показали, що флавоноїди мають найкращі антиоксидантні властивості завдяки їхній низькій енергії потенціалу іонізації ($I = 8.59\text{--}9.13\text{ eV}$) та невеликій різниці енергій ВЗМО–НВМО ($\Delta E = 7.57\text{ eV}$), що сприяє ефективній реалізації механізмів передачі електронів і атомів водню. Катехін та ксантохумол також проявляють високу електрофільність ($\omega \approx 4.8\text{--}4.9\text{ eV}$), що забезпечує їхню здатність до зв'язування вільних радикалів через капканний (хелатування) механізм. Альфа- і бета-кислоти (гумулон і лупулон) демонструють помірну антиоксидантну активність, обумовлену здатністю до передачі атома водню та взаємодії з металами. Їхні значення електрофільності ($\omega \approx 3.0\text{ eV}$) та нуклеофільності ($\chi = 1.2\text{--}1.37\text{ eV}$) свідчать про можливість використання цих сполук для стабілізації вільних радикалів і хелатування металів. β -каріофілен, α -гумулен продемонстрували найнижчий антиоксидантний потенціал через високу жорсткість ($\eta \approx 5.26\text{--}5.30\text{ eV}$) та високу різницю енергій $\Delta E = 10.5\text{--}10.6\text{ eV}$, що ускладнює передачу електронів і атомів водню. Однак ці сполуки можуть бути використані як додаткові компоненти в антиоксидантних композиціях завдяки їхнім іншим функціональним властивостям. Таким чином, квантово-хімічний аналіз дозволив спрогнозувати механізми антиоксидантної дії сполук хмелю, серед яких домінують SET, HAT, та хелатування металів. Отримані результати можуть слугувати основою для розробки нових антиоксидантних засобів із використанням біологічно активних речовин хмелю.

Ключові слова: стабільність, молекулярна структура, молекули, антиоксиданти, флавоноїди, квантова хімія, механізм дії, радикали.

Постановка проблеми. Вивчення антиоксидантної активності екстрактів шишок хмелю (*Humulus L.*) є актуальним через широкі можливості їх застосування в хімічній технології, харчовій, фармацевтичній і косметичній промисловостях. Екстракти хмелю містять ряд сполук, таких як флавоноїди, поліфеноли і ефірні олії, які демонструють виражену антиоксидантну активність [1-2]. Актуальність досліджень зумовлена також потребою у природних антиоксидантах, які є безпечними для людини та можуть слугувати альтернативою синтетичним сполукам [3]. Крім того, вивчення антиоксидантних властивос-

тей сприяють розумінню хімічних механізмів, що лежать в основі антиоксидантних властивостей хмелю, та відкривають нові перспективи для його використання. Розробка косметичних та фармацевтичних продуктів на основі хмелю з підвищеною антиоксидантною активністю може сприяти не тільки заміні існуючих синтетичних антиоксидантів, а й розробці нових унікальних багатофункціональних продуктів, оскільки хміль має антибактеріальні властивості. Основні сполуки в екстрактах шишок хмелю включають альфа-кислоти (гумулон, ко-гумулон та аду-гумулон) – головні компоненти, що відповідають за гіркий

смак хмелю. Бета-кислоти (лупулон, ко-лупулон та аду-лупулон). Вони можуть впливати на аромат та створювати антибактеріальні ефекти. Ефірні олії – відповідають за ароматичний профіль хмелю. Основні компоненти включають мірцен, гумулен, каріофілен та фарнезен. Мірцен додає квітково-фруктові нотки, гумулен – деревні та пряні, каріофілен – гвоздично-пряний аромат. Флавоноїди (ксантогумол, десмоксантогумол) та поліфеноли – мають антиоксидантні властивості і потенційний антиоксидантний ефект [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки спостерігається значне зростання досліджень, що застосовують квантово-хімічні методи для оцінки антиоксидантної активності природних сполук. Ці методи дозволяють досліджувати молекулярні механізми, що лежать в основі антиоксидантної активності, з високою точністю та детальністю. Дослідження екстрактів різних рослинних екстрактів є одним із напрямків, де квантова хімія стала важливим інструментом. Сучасні публікації часто зосереджуються на комбінованому використанні квантово-хімічних методів та експериментальних підходів для оцінки антиоксидантної активності флавоноїдів, поліфенолів та інших компонентів [3]. Завдяки такому підходу вдається не лише ідентифікувати ключові антиоксидантні компоненти, а й розробити рекомендації щодо їхнього вилучення, а саме екстракції та подальшого використання. Однак, на теперішній час більше досліджень сфокусовано на вивченні загальної групи поліфенолів, зокрема флавоноїдів. А флавоноїди, що характерні саме шишкам хмелю – ксантогумол, майже не вивчені. Також, альфа- та бета-кислоти майже не розглянуті [4-5].

Квантово-хімічні розрахунки (КХР) використовують для здійснення теоретичних розрахунків антиоксидантної активності. А саме, квантово-хімічні методи, такі як теорія функціоналу щільності, широко застосовуються для моделювання антиоксидантних властивостей окремих молекул. Вони дозволяють визначити такі параметри, як енергія дисоціації зв'язку O-H, ентальпія взаємодії з вільними радикалами та індекси хімічної реактивності. Дослідження закордонних вчених показали, що ці параметри є критичними для розуміння механізмів інгібування окислювальних процесів. Також КХР використовують для вивчення механізмів передачі електронів та протонів. Останні публікації вказують на те, що ефективність антиоксидантів визначається їх здатністю до передачі електронів або протонів [4-5]. Зокрема,

моделювання механізмів SPLET (sequential proton loss electron transfer) та HAT (hydrogen atom transfer) допомагає передбачити антиоксидантну активність різних молекул. Квантово-хімічні розрахунки дозволяють не лише дослідити ці механізми, але й оптимізувати структуру антиоксидантів для підвищення їх ефективності.

Постановка завдання. Квантово-хімічні розрахунки є важливим інструментом для оцінки антиоксидантної активності складових екстрактів шишок хмелю, оскільки вони дозволять глибше зрозуміти механізми взаємодії хімічних сполук з вільними радикалами. Екстракти хмелю містять перелік антиоксидантів, які характерні тільки трав'янистим рослинам роду Хміль (*Humulus L.*). Зокрема, гумулон, ко-гумулон та ад-гумулон, лупулон, ко-лупулон та ад-лупулон та інші. А також, деякі флавоноїди – ксантогумол. Завдяки квантово-хімічним методам, зокрема розрахункам щільності електронів та параметрам реакційної здатності, можна оцінити здатність окремих компонентів хмелю до нейтралізації вільних радикалів. Ці розрахунки дозволять прогнозувати антиоксидантну активність на молекулярному рівні, що є важливим для оптимізації використання хмелю в хімічній технології, харчовій і фармацевтичній галузях. Окрім цього, вони можуть виявляти найбільш ефективні компоненти антиоксиданти в складі хмелю, що сприяє розробці нових способів екстракції, підбору розчинників для певних сполук за їх полярністю для подальшого створення харчових добавок або лікарських засобів, фармацевтично-косметичних препаратів з підвищеною антиоксидантною дією. Квантово-хімічні дослідження є особливо актуальними в умовах зростання інтересу до природних антиоксидантів, адже вони забезпечують ефективний спосіб оцінки та підвищення корисних властивостей рослинної сировини. Тому метою роботи було використовувати квантово-хімічні обчислювальні розрахунки за одержаними індексами реакційної здатності провести прогнозну оцінку антиоксидантної активності представників основних класів сполук шишок хмелю.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень. Реакційна здатність представників ефірних олій, альфа-, бета-кислот та поліфенолів була прогнозована у середовищі HyperChem із використанням напівемпіричних методів оптимізації та моделювання молекул. Оптимізацію молекул здійснювали за розширеним методом Р-М3, застосовуючи силові поля MM+ (базовані на MM2). Індекси реакцій-

ної здатності визначалися на основі енергетичних та структурних параметрів молекул з квантово-хімічних розрахунків. Були встановлені локальні та реактивні параметри реакційної здатності за формулами (табл. 1). Адсорбційну активність оцінювали з урахуванням таких індексів, як електронна густина на граничних орбіталях (Е ВЗМО і Е НВМО), енергетичний зазор, електронегативність, жорсткість та м'якість молекул, відповідно до теорії функціональної щільності.

Отримані експериментальні результати. На рис. 1 представлено оптимізовані структури молекул сполук представників основних класів сполук шишок хмелю, а саме розміщення Е ВЗМО та Е НВМО. Таблиця 2 містить дані про енергетичні характеристики сполук, що можна пов'язати з їх антиоксидантними властивостями. Зокрема представлені Е(ВЗМО) – значення енергії, вищої та нижньої молекулярних Е(НВМО) орбіталей та ΔE – різниця між енергіями ВЗМО та НВМО, яка відображає ширину забороненої зони, що важливо для характеристики антиоксидантних властивостей. Менші значення ΔE (ксантохумол та катехін) вказують на їх високу реакційність, тобто ці сполуки теоретично будуть легше віддають електрони для нейтралізації вільних радикалів. Це означає, що прогностично вони мають вищу антиоксидантну активність. Ці сполуки здатні ефективно знешкоджувати вільні радикали, особливо у водному середовищі. Помірні значення ΔE (-8.054 у гумулону та -8.076 у лупулону) вказують на баланс між стабільністю та реакційною здатністю. Це робить їх ефективними антиоксидантами, особливо у неводних або жирних середовищах. Найвищу різницю ΔE мають ефірні олії,

що вказує також на їх більшу стабільність. Їх антиоксидантна дія може бути менш вираженою, порівняно з флавоноїдами чи кислотами. Проте ці сполуки можуть виконувати допоміжну антиоксидантну функцію.

У таблиці 3 представлені індекси реакційної здатності молекул, які дозволяють оцінити антиоксидантні властивості різних сполук. Основні індекси включають потенціал іонізації (визначає енергію, необхідну для віддачі електрона), афінність до електрона (відображає здатність молекули приймати електрон), жорсткість молекули (η) – стабільність молекули у стані збудження. Електрофільність (ω) – здатність молекули приймати електрони (характеристика електронодефіцитних центрів). Аналіз отриманих результатів свідчить, що флавоноїди (Ксантохумол, Катехін), які мають низький потенціал іонізації (8.59–9.13 eV), мають більшу здатність до віддачі електронів. В той же час висока електрофільність (ω) ≈ 4.89 для Катехіну, вказує на здатність захоплювати радикали. Найвища серед всіх досліджуваних сполук нуклеофільність (χ) серед сполук (1.377–1.423 eV), свідчить, що флавоноїди прогностичні здатні проявити ефективність у нейтралізації оксидантів.

Помірна жорсткість (η) (≈ 3.5 – 3.7), дозволяє молекулам бути достатньо стабільними у збудженому стані, але реактивними. Отже, флавоноїди мають найкращі антиоксидантні властивості, оскільки здатні ефективно віддавати електрони та взаємодіяти з радикалами. При розгляді індексів реакційної здатності Альфа- та бета-кислоти (Гумулон, Лупулон) можна зазначити, що потенціал іонізації низький (≈ 9.32 – 9.57), що свідчить про їх здатність до електронного донорства. Елек-

Таблиця 1

Квантово-хімічні дескриптори та розрахункові параметри реакційної здатності органічних сполук для оцінки антиоксидантної активності сполук

Е ВЗМО	Вища зайнята молекулярна орбіталь
Е НВМО	Нижча вакантна молекулярна орбіталь
$I = - (E \text{ ВЗМО})$	Потенціал іонізації
$A = - (E \text{ НВМО})$	Спорідненість до електрону
$\Delta E = E(\text{ВЗМО}) - E(\text{НВМО})$	Енергетичний зазор молекулярних орбіталей
$\chi = -\mu = \frac{1}{2}(I + A)$	Абсолютна електронегативність
$\eta = \frac{1}{2}(I - A)$	Жорсткість молекули
$S = \frac{1}{2}\eta$	М'якість
$\omega = \frac{(I + A)^2}{8(I + A)}$	Індекс електрофільності

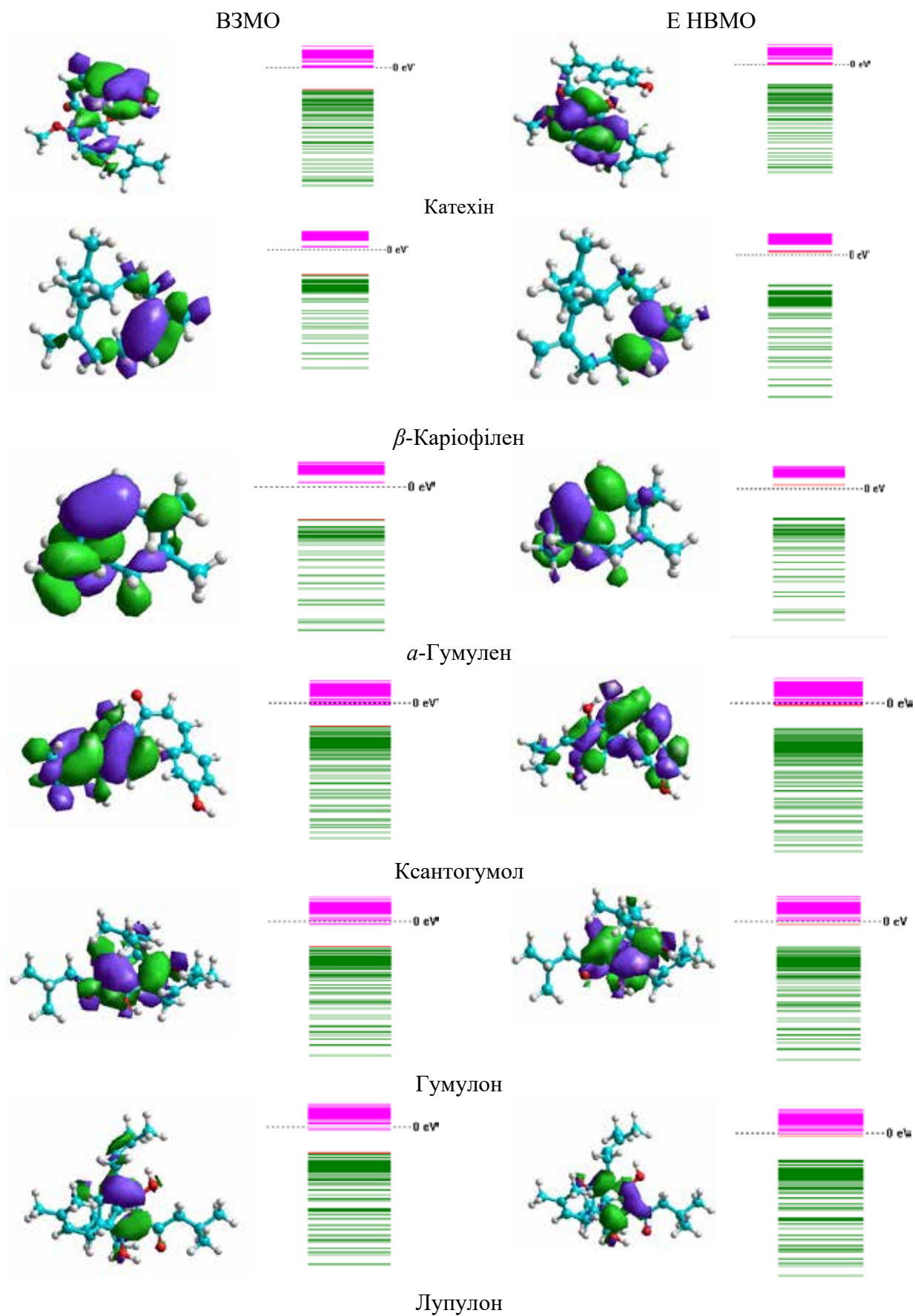


Рис. 1. Оптимізовані структури молекул розміщення Е ВЗМО та Е НВМО

трофільність (ω) у молекул альфа- та бета-кислот середня ($\approx 3.0\text{--}3.4$), що вказує на збалансовані реакційні властивості. Нуклеофільність (χ) трохи нижча, ніж у флавоноїдів ($\approx 1.2\text{--}1.37$), але достатня для антиоксидантної дії. Жорсткість (η) у молекул альфа- та бета-кислот середня ($\approx 3.44\text{--}3.9$), що забезпечує стабільність молекули. Отже, альфа- та бета-кислоти мають хороші антиоксидантні властивості, але менш виражені порівняно з флавоноїдами.

На основі квантово-хімічних параметрів, поданих у таблиці 2–3, можна визначити основні механізми антиоксидантної дії досліджуваних сполук [6].

1. Донорство електронів (SET – Single Electron Transfer). Механізм передбачає передачу одного електрона антиоксидантом до вільного радикала, що стабілізує останній. В цьому випадку важливими параметрами КХР є потенціал іонізації (I) і чим менше значення потенціалу іонізації, тим легше молекула може віддати електрон. Флавоноїди (ксантогумол, катехін) мають низький потенціал іонізації (8.59–9.13), що робить їх ефективними донорами електронів і прогностично ці сполуки будуть мати такий механізм антиоксидантної дії. Альфа- і бета-кислоти (гумулон, лупулон) також здатні працювати через SET, але їхня активність дещо нижча. Ефірні олії (β -каріофілен, α -гумулен) мають високий потенціал іонізації (9.65–9.67 eV), що ускладнює реалізацію цього механізму [7].

2. Донорство протонів (HAT – Hydrogen Atom Transfer). Цей механізм передбачає передачу атома водню разом із його електроном для нейтралізації радикала. В цьому випадку важливими параметрами КХР є жорсткість молекули (η). Менша жорсткість вказує на легшу передачу протона. Флавоноїди (катехін, ксантогумол) мають помірну жорсткість (3.5–3.7 eV), що дозволяє їм легко передавати протон, роблячи ці сполуки високоефективними для HAT механізму. Альфа- і бета-кислоти (гумулон, лупулон) мають подібну жорсткість (3.44–3.9 eV), що робить їх придатними для цього механізму в рівній мірі до флавоноїдів. Ефірні олії мають високу жорсткість (5.26–5.30 eV), що значно знижує їхню здатність працювати через HAT механізм [8].

3. Хелатування металів (Metal Chelation). Антиоксиданти можуть зв'язувати перехідні метали, які сприяють утворенню вільних радикалів через реакції Фентона. В цьому випадку важливими параметрами КХР є електронна густина в активних центрах (залежить від жорсткості й афінності до електрона). Флавоноїди завдяки високій реактивності та електрофільності добре взаємодіють із металами, а альфа- і бета-кислоти також можуть бути ефективними у зв'язуванні металів. Ефірні олії малоефективні через високу жорсткість і низьку електрофільність.

4. Переривання ланцюгових реакцій окиснення. Цей механізм передбачає взаємодію антиоксиданту з вільним радикалом, що перериває

Таблиця 2

Енергетичні параметри молекул

Сполука		Е ВЗМО	Е НВМО	ΔE
Ефірні олії	β -Каріофілен	-9.6593	0.8711	-10.5305
	α -Гумулен	-9.6773	0.9326	-10.6099
Флавоноїди	Ксантогумол	-8.5982	-1.0205	-7.5777
	Катехін	-9.1295	-2.2490	-6.8805
Альфа-кислоти	Гумулон	-9.5379	-1.4830	-8.0549
Бета-кислоти	Лупулон	-9.3257	-1.2490	-8.0767

Таблиця 3

Індекси реакційної здатності молекул

Сполуки	Потенціал іонізації	Ядерної подібності до електронів	Електро-ненативність χ	Жорсткість η	М'якість σ	Індекс електрофільності ω
β -Каріофілен	9.6593	-0.8711	4.3941	5.2652	0.1899	1.0985
α -Гумулен	9.6773	-0.9326	4.3724	5.3050	0.1885	1.0931
Ксантогумол	8.5982	1.0205	4.8094	3.7888	0.2639	1.2023
Гумулон	9.5379	1.4830	5.5104	4.0274	0.2483	1.3776
Лупулон	9.3257	1.2490	5.2874	4.0384	0.2476	1.3218
Катехін	9.1295	2.2490	5.6892	3.4402	0.2907	1.4223

окислювальний ланцюг. В цьому випадку важливими параметрами КХР є мала різниця енергій ΔE . Так, легкий перехід між станами ВЗМО та НВМО дозволяє швидко взаємодіяти з радикалами. Флавоноїди завдяки низьким значенням ΔE (≈ 7.57 eV) є найкращими для переривання окисних ланцюгів. Альфа- і бета-кислоти також можуть працювати через цей механізм, але трохи менш ефективно ($\Delta E \approx 8.05\text{--}8.07$ eV). Ефірні олії великі значення ΔE ($\approx 10.5\text{--}10.6$) обмежують здатність до цього механізму. На основі квантово-хімічних досліджень можна виділити основні механізми антиоксидантної дії досліджуваних сполук. Для флавоноїдів до всіх чотирьох механізмів антиоксидантової дії. Альфа- і бета-кислоти (гумулон, лупулон) помірно ефективні, але добре повинні працювати у неводних середовищах. Ефірні олії (β -каріофілен, α -гумулен) мають низький антиоксидантний потенціал і можуть виконувати лише допоміжну роль [9].

Висновки. Найсильнішими антиоксидантами за прогнозом КХР є флавоноїди (ксантохумол і катехін) через їхню високу реакційну здатність. Альфа- і бета-кислоти (гумулон, лупулон) займають друге місце за антиоксидантною активністю, оскільки мають оптимальне співвідношення між стабільністю та реакційною здатністю. Ефірні олії (α -каріофілен і α -гумулен) мають менший антиоксидантний потенціал, але їх стабільність дозволяє використовувати їх у комбінації з іншими сполуками. Флавоноїди (Ксантохумол, Катехін) за теоретичними розрахунками будуть мати найкращі антиоксиданні властивості завдяки низькій жорсткості, високій електрофільності та нуклеофільності. Альфа- та бета-кислоти (Гумулон, Лупулон) прогнозно повинні мати помірні антиоксидантні властивості. Низька антиоксидантна активність очікується у ефірних олій (β -Каріофілен, α -Гумулен) через високу стабільність і низьку реакційну здатність.

Список літератури:

1. Stevens J. F., Page J. E. Xanthohumol and related prenylflavonoids from hops and beer: To your good health. *Phytochemistry*. 2004. № 65(10). С. 1317–1330.
2. Wang M., Hettiarachchy N. S., Qi M., Burks W., Siebenmorgen T. Preparation and functional properties of rice bran protein isolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1999. № 47(2). С. 411–416.
3. De Keukeleire J., Ooms G., Heyerick A., Roldán-Ruiz I., De Keukeleire D. Formation and accumulation of α -acids, β -acids, desmethylxanthohumol, and xanthohumol during flowering of hops (*Humulus lupulus* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007. № 55(15). С. 6036–6043.
4. Goiris K., Bracke N., De Ridder D., De Cooman L., Vandamme E. J. Hop-derived components and their applications in brewing and beyond. *Phytochemistry Reviews*. 2014. № 13(1). С. 155–184.
5. Friedrich J., Neuwirth C., König B. Antioxidant activity of hop-derived chalcones in an oil-in-water emulsion. *Journal of Food Science and Technology*. 2015. № 52(4). С. 2043–2050.
6. Kavalier A. R., Litt A., Ma C. Phytochemical and morphological characterization of hop (*Humulus lupulus* L.) accessions with an emphasis on xanthohumol content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. № 59(16). С. 8668–8676.
7. Rodriguez L., Medina M., Alcázar A., Moyano L. Antioxidant and antimicrobial properties of hop extracts: Applications in food preservation. *Food Chemistry*. 2020. № 318. С. 126512.
8. Villa-Rodriguez J. A., Arellano-Ruiz M., Rodriguez-Tadeo A. Effects of hop polyphenols on lipid peroxidation in model food systems. *Journal of Food Biochemistry*. 2017. № 41(2). С. e12345.
9. Matiacevich S. B., Buera M. P., Chirife J. Influence of hop extracts on oxidative stability of vegetable oils. *LWT – Food Science and Technology*. 2012. № 47(1). С. 1–8.

Dudka M.V., Vorobiova V.I. ANTIOXIDANT PROPERTIES OF COMPOUNDS DERIVED FROM HOP CONES (*HUMULUS LUPULUS*): A QUANTUM-CHEMICAL PERSPECTIVE

*The antioxidant properties of compounds derived from hop cones (*Humulus lupulus*) highlight their potential in pharmaceutical, food, and cosmetic industries. This study provides a quantum-chemical analysis of key bioactive substances in hops, including flavonoids (xanthohumol, catechin), essential oils (β -caryophyllene, α -humulene), and alpha- and beta-acids (humulone, lupulone). Calculations were performed using density functional theory (DFT) to determine the energetic parameters of molecules such as the energy of the highest occupied molecular orbital (HOMO), the lowest unoccupied molecular orbital (LUMO), ionization potential, hardness, electrophilicity, nucleophilicity, and the energy gap between HOMO and LUMO (ΔE). The results demonstrated that flavonoids possess the best antioxidant properties due to their low ionization potential ($I = 8.59\text{--}9.13$ eV) and small HOMO–LUMO energy gap ($\Delta E = 7.57$ eV), enabling efficient mechanisms for electron transfer (SET) and hydrogen atom transfer (HAT). Catechin and xanthohumol also exhibit high electrophilicity ($\omega \approx 4.8\text{--}4.9$ eV), ensuring their ability to scavenge free radicals through a trapping (chelating)*

mechanism. Alpha- and beta-acids (humulone and lupulone) show moderate antioxidant activity, attributed to their capacity for hydrogen atom transfer and interaction with metals. Their electrophilicity ($\omega \approx 3.0$ eV) and nucleophilicity ($\chi = 1.2\text{--}1.37$ eV) suggest these compounds can stabilize free radicals and chelate metals effectively. β -caryophyllene and α -humulene demonstrated the lowest antioxidant potential due to high hardness ($\eta \approx 5.26\text{--}5.30$ eV) and a large energy gap ($\Delta E = 10.5\text{--}10.6$ eV), which hampers electron and hydrogen atom transfer. However, these compounds could serve as auxiliary components in antioxidant compositions due to their other functional properties. Thus, the quantum-chemical analysis enabled the prediction of antioxidant mechanisms in hop compounds, predominantly SET, HAT, and metal chelation. These findings can form the basis for developing new antioxidant agents utilizing the bioactive substances of hops.

Key words: stability, molecular structure, molecules, antioxidants, flavonoids, quantum chemistry, mechanism of action, radicals.

УДК 621.357

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/23>**Забалуєв А.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Ущановський Д.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Воробйова В.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Васильєв Г.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лінючева О.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ, МЕХАНІЧНІ ТА КАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ

У статті досліджено електрохімічні характеристики, механічні та каталітичні властивості покриттів на основі нікелю отриманих із водних електролітів на основі низькотемпературного евтектичного розчинника – реліну. Доведено формування реліну на основі ІЧ-спектроскопічних досліджень, проведених за допомогою Bruker Tensor II спектрометра.

На основі потенціодинамічних вольт-амперних вимірювань, при дослідженні електроосадження нікелевих покриттів, показано, що основним фактором впливу на перенапругу виділення металу є температура. Виявлено, що збільшення швидкості сканування потенціалу не призводить до виникнення чітко виражених максимумів граничного струму притаманних контролюючій дифузійній стадії. Це, з одного боку, може бути пов'язане із маскуючим впливом побічного процесу виділення водню. З іншого боку, це може бути наслідком переважаючого контролю стадії дисоціації комплексних іонів на основі нікелю. Відсутність вираженого максимуму граничної густини струму є притаманним як водним цитратним, так і електролітам нікелювання на основі реліну.

Встановлено, що найменша швидкість корозії та найбільша мікротвердість очікувано спостерігається для нікелевих та нікель-вольфрамових покриттів отриманих з водного цитратного електроліту.

У статті виявлено, що покриття отримані з електроліту на основі низькотемпературного евтектичного розчинника є корозійно нестабільними в хлоридному середовищі. Порівняно високі швидкості корозійного руйнування можуть пояснюватись особливостями кристалічної структури, наявністю тріщин та продуктів розкладу електроліту на основі НЕР в покритті.

Показано, що найменша перенапруга виділення водню спостерігається на покриттях, отриманих з електролітів на основі НЕР – реліну. Це, є наслідком, формування покриттів із нановпорядкованою та високорозвинутою структурою поверхні.

Ключові слова: покриття на основі нікелю, низькотемпературний евтектичний розчинник, діаграми впровадження, мікротвердість, корозійна стійкість, електрокаталітичні властивості.

Постановка проблеми. Гальванічні нікелеві покриття з огляду на ряд особливих властивостей набувають широкого застосування у промисловості. Технологічні параметри процесу електро-

лізу та склад електроліту в значній мірі можуть визначати фізико-хімічні та фізико-механічні характеристики відповідних покриттів. Більшість використовуваних технологічних процесів

нанесення гальванічних покриттів включають використання добре вивчених водних розчинів електролітів [1–3]. Новітнім напрямком у гальванотехніці є використання електролітів на основі неізохотемпературних евтектичних розчинників (НЕР), які являють собою продукт взаємодії органічних сполук за донорно-акцепторним механізмом. У разі дисоціації молекул на іони такі розчинники у розплавленому стані ще називають іонними рідинами, через схожість їх фізико-хімічних властивостей із розплавами солей [4]. Однак комплекс властивостей гальванічних покриттів отримуваних з електролітів на основі НЕР є маловивченим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою покращення фізико-хімічних властивостей покриття на основі нікелю легують молібденом та вольфрамом. Це призводить також до покращення корозійної стійкості покриттів на основі нікелю [5]. При цьому, наприклад, електроосадження Ni-W покриттів, може бути більш економічно вигідним через набагато вищу струмову ефективність у порівнянні з процесом гальванічного хромування (55...65 % для Ni-W [5], проти 13...18 % для хрому [3]). Електроосадження покриттів із електролітів на основі НЕР протягом останнього часу зайняло трендовий напрям в галузі гальванотехніки [6–8]. Зокрема, для електроосадження нікелевих покриттів та покриттів сплавом нікель-молібден застосовуються електроліти, приготовані на основі НЕР – суміші холін хлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2 М [9]. Однак, беручи до уваги саме комплекс поліфункціональних властивостей, важливим є проведення порівняльних досліджень процесів електроосадження покриттів одночасно за багатьма параметрами. Це дозволить підвищити керованість процесу та виокремити галузь можливого застосування відповідних покриттів.

Постановка завдання. Таким чином, метою даної роботи є проведення комплексу порівняльних досліджень фізико-хімічних та механічних властивостей гальванічних покриттів на основі нікелю отриманих з водних електролітів та з електролітів на основі низькотемпературних евтектичних розчинників. Це, зокрема, дасть змогу оцінити перспективи впровадження та можливість удосконалення класичних технологій гальванотехніки.

Виклад основного матеріалу. Експериментальна частина. Електроосадження нікелевих та нікель-вольфрамових покриттів проводили з водного цитратного електроліту. Електроліт для

нанесення покриттів сплавом Ni-W містив 0,75 М $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та 0,5 М $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ і 0,07 М Na_2WO_4 . Додатково електроліт містив до 1 М хлориду амонію та 0,2 М тетраборату натрію. Водневий показник електроліту до рівня pH 6,5...8,5 доводили гідроксидом амонію. Для порівняння властивостей також отримували нікелеві покриття з електроліту Уотса [10, 11].

Також електроосадження нікелевих покриттів проводили із електроліту на основі низькотемпературної евтектичної суміші холін хлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2. Приготування електроліту здійснювали наступним чином. Холін хлорид та карбамід при температурі 80 °C підігрівали на водяній бані до утворення розтопу [10, 11]. За допомогою інфрачервоної спектроскопії отриману суміш аналізували на утворення відповідної евтектичної сполуки. Отримана за допомогою Bruker Tensor II спектрограма представлена на рис. 1.

Приведена на рис. 1 ІЧ-спектрограма підтверджує утворення низькотемпературного евтектичного розчину завдяки водневим зв'язкам між компонентами системи (карбамід-холін-хлоридом). Це видно з характерних піків для груп O-H, N-H і C=O, а також зі зміщення їх частот, що свідчить про специфічні взаємодії у НЕР. Широки смуги у високочастотному регіоні свідчать про складну мережу водневих зв'язків у системі, що є характерним для НЕР. Зміщення основних характеристичних піків свідчить про взаємодію між карбамідом, холін-хлоридом і хлорид-іоном, що підтверджує утворення НЕР. Інтенсивність смуг для C=O і N-H демонструє стабільність зв'язків у евтектичній системі. Широка смуга в діапазоні 3300–3500 cm^{-1} відповідає валентним коливанням аміногруп (N-H). Ця широка смуга свідчить про наявність водневих зв'язків у системі. Смуга в області 3200–3400 cm^{-1} (з перекриттям зі смугою N-H) також вказує на валентні коливання O-H групи холіну, які беруть участь у водневих зв'язках. Невеликі піки в області 2800–3000 cm^{-1} відповідають валентним коливанням C-H у метиленових ($-\text{CH}_2-$) і метильних ($-\text{CH}_3$) групах холіну. Смуга в діапазоні 1650–1700 cm^{-1} відповідає валентним коливанням карбонільної групи (C=O) у карбаміді. Її зсув вказує на взаємодію з хлорид-іоном і водневими зв'язками. Смути в діапазоні 1300–1600 cm^{-1} відповідають деформаційним і валентним коливанням C-N зв'язків, характерних для сечовини та холіну. Смуга в області 400–600 cm^{-1} може відповідати асоціації хлорид-іона з іншими компонентами НЕР.

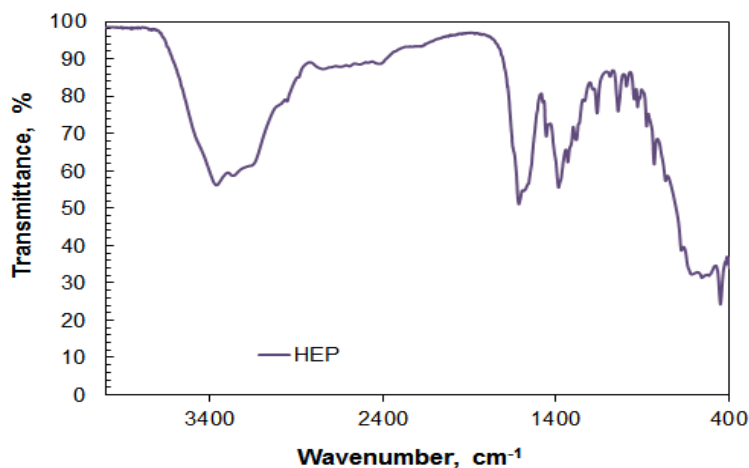


Рис. 1. ІЧ-спектроскопічне підтвердження утворення НЕР на основі холін-хлориду та карбаміду

Після отримання розплаву з НЕР у нього вводили 0,75 М $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та 0,5 М лимонної кислоти. З метою дослідження можливості електроосадження нікелевих покриттів легованих вольфрамом в отриманий електроліт додатково 0,07 М вводили вольфрамат Na_2WO_4 . Дослідна температура при електроосадженні становила 75 °С. З метою порівняння процесів електроосадження нікелевих покриттів в електролітах на водній основі та на основі НЕР молярні концентрації солей нікелю та вольфраму були однаковими. Більш детально методика електроосадження описана в [10]. За даними кількісного аналізу складу поверхні електроосаджених нікелевих покриттів, виконаних на мікроскопі TESCAN VEGA3, оснащеному EDX аналізатором BRUKER QUANTAX EDS, було встановлено наступне. При електроосадженні нікелевих покриттів з водних цитратних електролітів за густини струму 1 А/дм² був досягнутий вміст вольфраму в сплаві 14,6 мас.%. При дослідженні електролітів на основі НЕР введення вольфрамату натрію не призвело до включення вольфраму в покриття [10, 11].

З метою дослідження механізму катодного процесу проводили поляризаційні вимірювання. Для цього застосовували цифровий потенціостат VersaStat3 2 AMP. Отримання катодних поляризаційних кривих проводили у потенціодинамічному режимі за швидкостей сканування потенціалу 1...100 мВ/с. Вольт-амперні криві отримували з використанням триелектродних комірок, робочим електродом слугував нікелевий циліндричний стрижень запресований у тефлон. Допоміжним електродом слугувала пластина з електролітичної нікелевої фольги марки

Н0, електродом порівняння – насичений хлор срібний електрод. При знятті поляризаційних кривих у неводному електроліті на основі НЕР, через малу провідність середовища, електродом порівняння слугувала срібна дрітина, яку в поліпропіленовому капілярі розташовували безпосередньо в дослідній комірці. Потенціал срібної дротини додатково вимірювали відносно насиченого хлор-срібного електрода порівняння [10]. У даній роботі всі електродні потенціали приведені в шкалі насиченого хлор-срібного електрода порівняння.

Спочатку у водних розчинах були проведені дослідження впливу температури на процес електроосадження нікелю. Як і очікувалось, зі збільшенням температури катодна поляризація зменшуються, а нахили катодних кривих зростає (рис. 2). З отриманих поляризаційних кривих видно, що збільшення температури очікувано призводить до зростання струму на поляризаційних кривих і, відповідно, до зменшення перенапруги катодного процесу. Було помічено, що осаді нікелю, отримані на катоді при температурі 20 °С, були напруженими, тріскались і відшаровувалися від поверхні катода. Осаджені при 70 °С осаді були грубокристалічними і темними. Найбільш якісні світлі і дрібнокристалічні осаді нікелю та нікель-вольфрамового сплаву були отримані при температурі 50 °С. Саме цю температуру осаження із водних електролітів було обрано для подальших досліджень властивостей осадів на основі нікелю.

З метою вивчення механізму катодного процесу у досліджуваних розчинах були отримані катодні потенціодинамічні криві при різній швидкості сканування потенціалу (рис. 3). Як видно із відповідного рисунку, зі збільшенням швид-

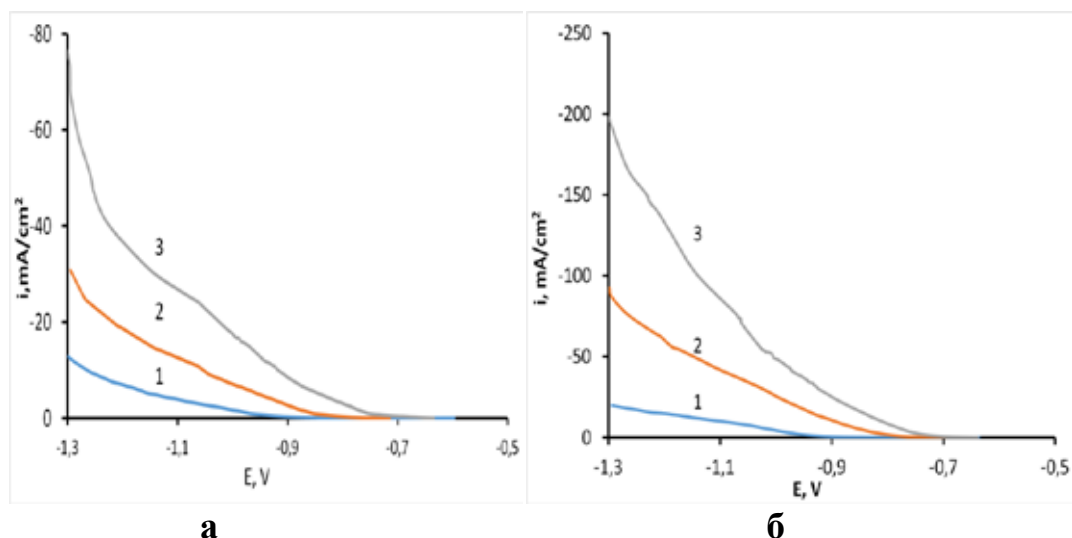


Рис. 2. Вплив температури на катодні поляризаційні криві електроосадження Ni (а) та Ni-W сплаву (б), швидкість сканування потенціалу 1 мВ/с, температура, °С: 1 – 20; 2 – 50; 3 – 70

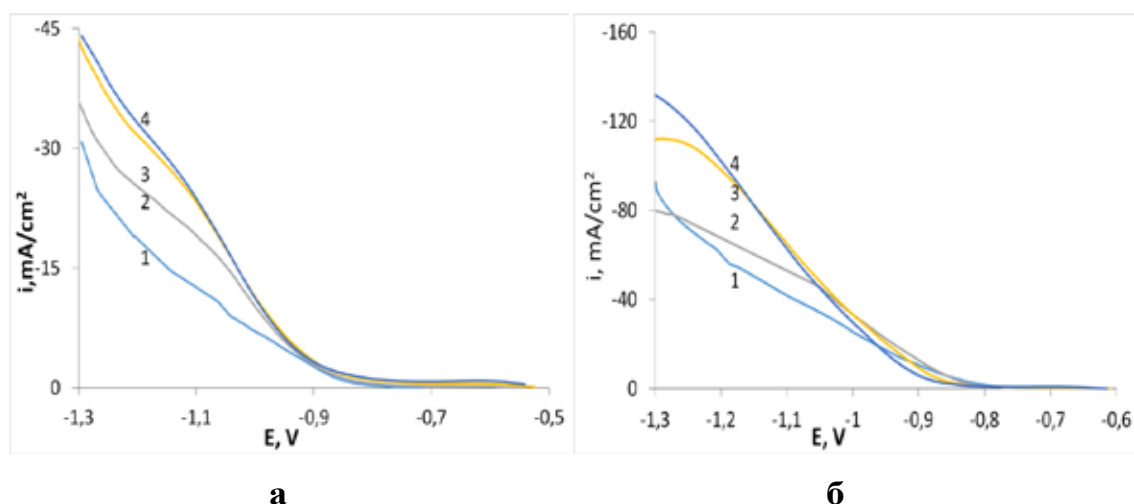


Рис. 3. Вплив швидкості сканування потенціалу на катодні поляризаційні криві електроосадження Ni (а) та Ni-W сплаву (б) за температури 50 °С, швидкість сканування потенціалу, мВ/с: 1 – 1; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 100

кості розгортки нахил катодної кривої збільшується. Однак на поляризаційних кривих як для осадження нікелю, так і для нікель-вольфрамового сплаву, в цитратних електролітах чітко вираженого граничного струму із максимумом не спостерігається. Причиною цього може бути інтенсивне виділення водню в області потенціалів, від'ємніших за -1,0 В, що відбувається паралельно із електроосадженням нікелю та нікель-вольфрамового сплаву. Таким чином, отримані результати свідчать про те, що не можна однозначно говорити про переважну стадію доставки комплексних іонів нікелю до поверхні катода. Більш вірогідно, що саме їх подальша адсорбція та дисоціація комплексних іонів визначають загальну швидкість катодного процесу. Також

з рис. 2 та 3 видно, що значення катодних густин струму на кривих осадження сплаву нікель-вольфрам є вищими ніж для електроосадження чистого нікелю. З одного боку, це пов'язано особливостями процесу сплавоутворення при електроосадженні [10], з іншого боку, відомо [12], що нікель-вольфрамові сплави є більш каталітично активними щодо процесу виділення водню. Відповідно, цей побічний процес на сплаві перебігає більш інтенсивно, особливо в області високих значень катодного потенціалу.

Осадження нікелю з електроліту на основі НЕР проводили за температури 75 °С. Отримані при різних швидкості сканування потенціалу поляризаційні криві приведені на рис. 4. При проведенні поляризаційних вимірювань різниця між ходом

катодної поляризаційної кривої для електролітів на основі НЕР з додаванням та без вольфраму натрію була мінімальною і візуально малопомітною. Це пояснює поміченим раніше явищем відсутності впровадження вольфраму в сплав у відповідних системах [10, 11].

Як видно з рис. 4, на поляризаційних кривих в інтервалі потенціалів $-0,5 \dots -0,75$ В спостерігається чітко виражений граничний струм першої хвилі катодного процесу, який зростає зі збільшенням швидкості розгортки. Проте, за умови найменшої швидкості розгортки 1 мВ/с, яка відповідає стаціонарним умовам електроосадження, відповідна хвиля майже не спостерігається. Це вказує на те, що першочерговим може відбуватися електрохімічне перетворення самого НЕР, що узгоджується із встановленим порівняно невисоким виходом за струму нікелю на рівні 60% [10]. Таким чином, аналогічно водному розчину, контроль катодного процесу не є дифузійним. Хоча, через підвищену в'язкість електроліту на основі НЕР рухомість катіонів металу є набагато нижчою ніж у водному розчині. Проте, іони нікелю теж можуть досить міцно зв'язуватись у комплексні сполуки компонентами НЕР, руйнація зв'язків та дисоціація комплексу може бути переважаючою, подібно до водних цитратних електролітів.

Визначення швидкості корозії та каталітичної активності. Дослідження проводили із застосуванням зразків гальванічних покриттів нікелем товщиною 20 мкм, нанесених на сталеву основу. На основі знятих катодних та анодних поляризаційних кривих в корозійному серед-

овищі здійснювали побудову корозійних діаграм у напівлогарифмічних координатах (перенапруг – логарифм десятковий від густини струму). Катодні та анодні криві на досліджуваних зразках знімали у $3,5\%$ розчині хлориду натрію за температури 18°C . Швидкість сканування потенціалу становила 2 мВ/с. Для зняття поляризаційних кривих застосовували стандартну триелектродну комірку, таку ж як і при дослідженні катодного процесу електроосадження нікелевих покриттів. Допоміжним електродом слугувала платинова пластина площею 1 см^2 , у якості електрода порівняння використовували насичений хлор-срібний електрод. Побудовані на основі отриманих поляризаційних кривих корозійні діаграми представлені на рис. 5, 6.

З рис. 5,6 видно наступне. Для нікелю та нікель-вольфрамового сплаву спостерігається область активного розчинення при значенні анодної перенапруги до $+0,3$ В, при більш високих значеннях перенапруги спостерігається початок переходу металу в пасивний стан, як для чистого нікелю, так і для сплаву. Для зразків нікелевих покриттів, отриманих з електроліту на основі НЕР, струми анодного розчинення є набагато вищими, а введення вольфраму натрію в електроліт майже не впливає на корозійну поведінку. Останнє пов'язане з відсутністю впровадження вольфраму у структуру покриття [10, 11]. З метою порівняння значення швидкості корозії, визначені на основі рис. 5, 6 приведені в табл. 1.

З табл. 1 видно, що найменша швидкість корозії очікувано спостерігається для нікель-вольфрамових покриттів. Дещо, проте досить незначно,

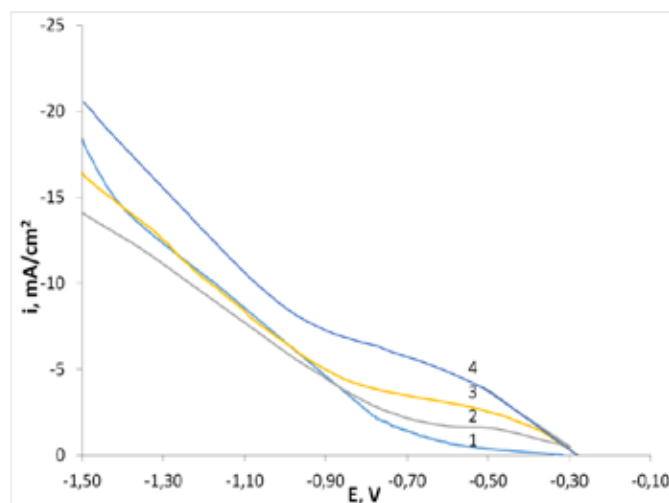


Рис. 4. Вплив швидкості сканування потенціалу на катодні поляризаційні криві електроосадження Ni з електроліту на основі НЕР за температури 75°C , швидкість сканування потенціалу, мВ/с: 1 – 1; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 100

вищою є швидкість корозії нікелевих покриттів отриманих із водного цитратного електроліту. Покриття отримані з електроліту на основі НЕР є корозійно нестійкими в хлоридному середовищі. Такі високі швидкості корозійного руйнування можуть, зокрема, пояснюватись особливостями кристалічної структури покриття, наявністю крупнокристалічних зерен та тріщин в покритті [10]. Крім цього, низький вихід за струмом (близько 60 %) свідчить про включення до складу покриття продуктів розкладу електроліту на основі НЕР, які можуть пришвидшувати корозійне руйнування. Про це також свідчать наведені у таблиці 1 значення потенціалів корозії.

Електрохімічну активність щодо процесу виділення водню оцінювали на основі аналізу катодних поляризаційних кривих, отриманих в у 3,5 % розчині хлориду натрію та побудованих у координатах перенапряга – густина струму (рис. 7).

З огляду на дані, приведені на рис. 7 можна зробити наступні висновки. Перенапряга виділення водню за катодної густини струму 5 mA/cm^2 на нікелевих покриттях становить близько 0,3 В. Введення до складу покриття 14,6 мас.% W призводить до зменшення перенапряги виділення водню майже на 0,1 В у порівняння з чистим нікелем. Це узгоджується з даними приведеними у [12] і пояснюється появою каталітично активних центрів

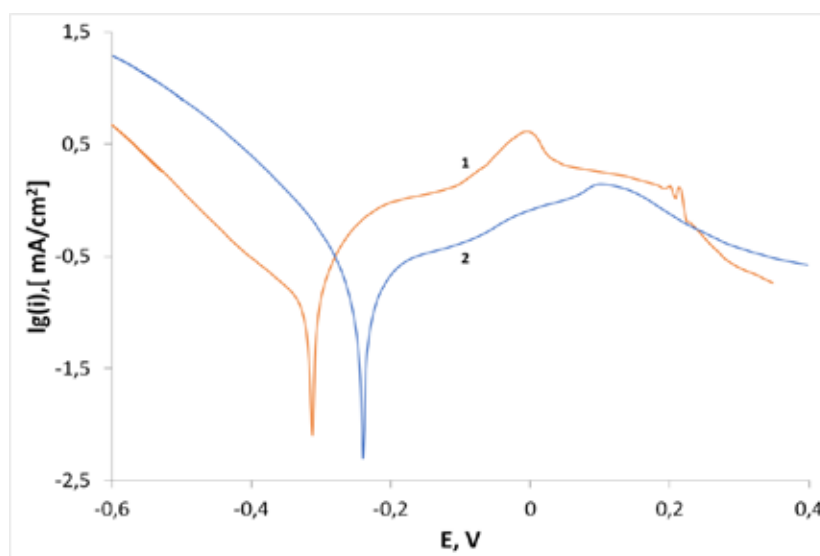


Рис. 5. Корозійні діаграми для нікелевого (1) та нікель-вольфрамового (2) покриттів отриманих з водного цитратного електроліту в 3,5 % NaCl за температури 18 °C

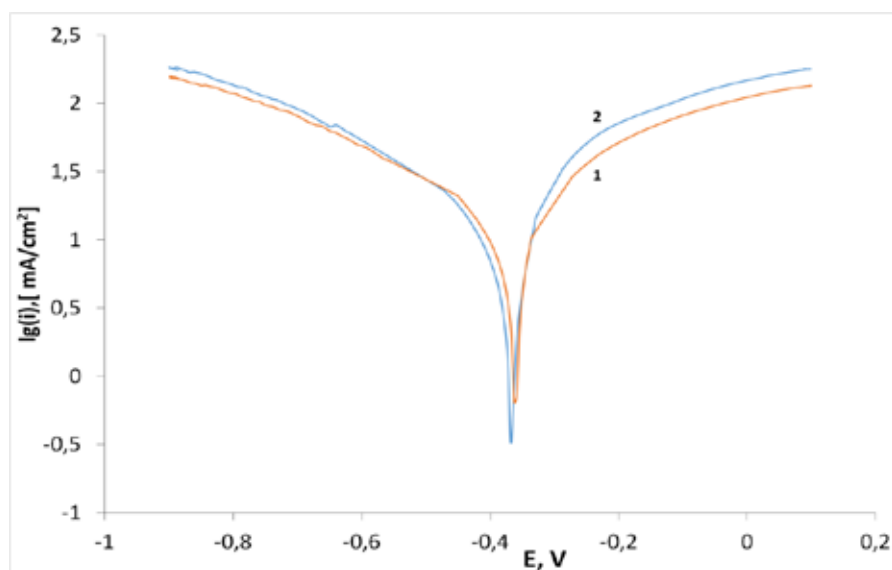


Рис. 6. Корозійні діаграми для нікелевого (1) та нікель-вольфрамового (2) покриттів отриманих з електроліту на основі НЕР в 3,5 % NaCl за температури 18 °C

Корозійні характеристики покриттів на основі нікелю

Характеристики	Нікелеві покриття, отримані з водних електролітів	Покриття сплавом Ni-W, (вміст W 14,6 мас.%)	Нікелеві покриття, отримані з електроліту на основі НЕР
$\lg(i_{\text{кор}})$, [мА/см ²]	-0,65	-1	0,8
$i_{\text{кор}}$, мА/см ²	0,22	0,1	6,3
$E_{\text{кор}}$, В	-0,31	-0,24	-0,37

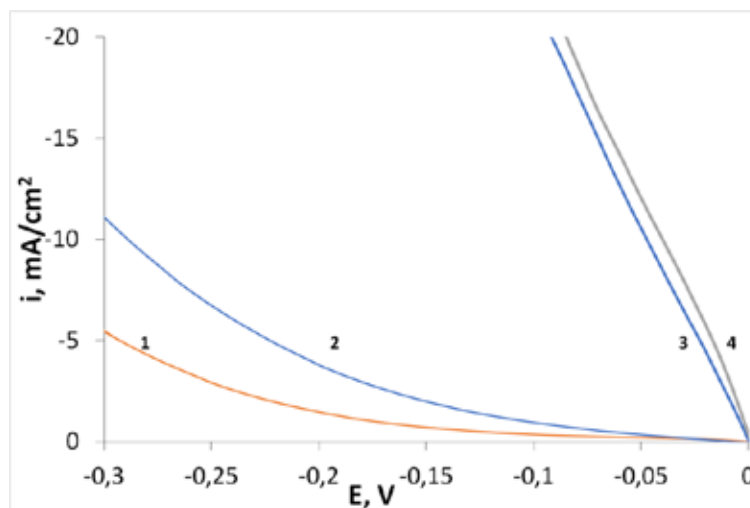


Рис. 7. Каталітична активність покриттів на основі нікелю щодо процесу катодного виділення водню: 1 – нікелевих, отриманих з цитратного електроліту; 2 – нікель-вольфрамових (14,6 мас.% W), отриманих з цитратного електроліту; 3 – нікелевих, з електроліту на основі НЕР; 4 – нікелевих, з електроліту на основі НЕР з додаванням Na_2WO_4

завдяки включенню вольфраму в сплав. Найменшою перенапругою виділення водню і відповідно найвищими електрокаталітичними властивостями щодо відповідного процесу серед досліджуваних володіють покриття, отримані з електроліту на основі НЕР. Перенапруга виділення водню на них за катодної густини струму 5 мА/см² не перевищує 0,02 В. Це у першу чергу пов'язане із нанопорядкованою та високорозвинутою структурою поверхні покриття [10, 11].

Мікромеханічні випробування електроосаджених нікелевих покриттів проводилися на універсальному мікротвердомірі-скретестері "Micron-gamma" [11, 13, 14] методом безперервного вдавлювання індентора. Вдавлювання індентора Берковича здійснювалось за постійної швидкості навантаження 0,45 сН/с. При цьому максимальне навантаження на індентор складало 30 сН. В ході відповідних випробувань здійснювали автоматичну реєстрацію величини навантаження на індентор та глибини його впровадження. Як наслідок отримували діаграми впровадження (рис. 8, 9), за якими оцінювали мікротвердість покриття в цілому. Основним оціночним параме-

тром в даному випадку виступала глибина впровадження індентора (табл. 2).

З даних приведених на рис. 8, 9 можна зробити наступні висновки. Чим більшою є мікротвердість покриття, тим відповідно меншою є глибина впровадження індентора при досягненні максимального навантаження. Таким чином нікелеві покриття, отримані з цитратного комплексних електролітів є більш твердими ніж отримані з електроліту Уотса (рис. 8, табл. 2). Впровадження у сплав вольфраму забезпечує осадження найбільш твердих покриттів серед відповідних досліджуваних (рис. 8 крива 3, табл. 2). Покриття нікелем, отримані з електроліту на основі НЕР теж мають доволі високу мікротвердість (рис. 9 крива 1, табл. 2), порівняну з нікелевими покриттями отриманими з водного цитратного електроліту. Введення в електроліт на основі НЕР вольфрамату натрію, хоча і не призводить до включення в структуру покриття вольфраму, проте сприяє отриманню більш крихких і механічно не стабільних покриттів, які руйнуються при відповідних дослідженнях. Про це також свідчить форма кривої 2 на рис. 9, де проявляється значна величина впровадження індентора та поличка

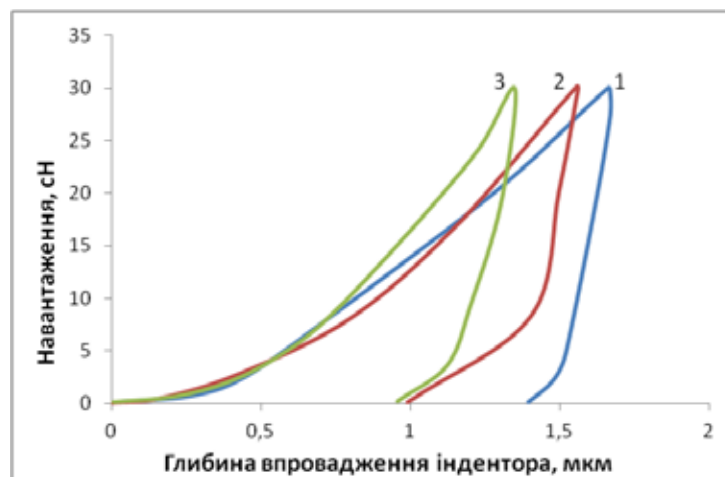


Рис. 8. Діаграми впровадження індентора Берковича для зразків нікелевих покриттів: 1 – осадженого з електроліту Уотса; 2 – осадженого цитратного електроліту нікелювання; 3 – отриманого з цитратного електроліту для осадження сплаву нікель-вольфрам

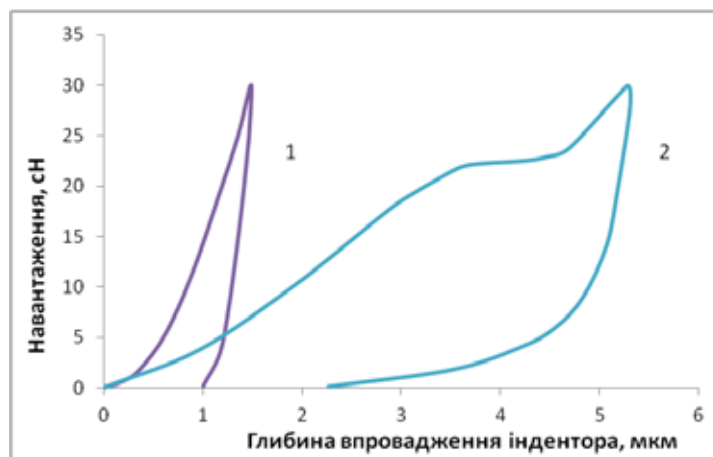


Рис. 9. Діаграми впровадження індентора Берковича для зразків нікелевих покриттів: 1 – осадженого з електроліту нікелювання на основі НЕР; 2 – осадженого з електроліту нікелювання на основі НЕР з додаванням вольфрамату натрію

Таблиця 2

Оцінювання мікротвердості досліджуваних нікелевих покриттів

Глибина впровадження індентора при навантаженні 30 сН, мкм				
Нікелеве покриття отримане з електроліту Уотса	Нікелеве покриття отримане з цитратного електроліту	Покриття сплавом Ni-W, (вміст W 14,6 мас.%) отримане з цитратного електроліту	Нікелеві покриття, отримані з електроліту на основі НЕР	Нікелеві покриття, отримані з електроліту на основі НЕР з додаванням Na_2WO_4
1,67	1,56	1,35	1,48	5,31

в інтервалі 3,5...4,5 мкм, що пов'язана із руйнуванням покриття під дією механічного навантаження [11].

Висновки. Таким чином в ході проведених досліджень було встановлено наступне. Відсутність дифузійної перенапруги в процесі електроосадження покриттів на основі нікелю із водних

цитратних електролітів сприяє отриманню рівномірних дрібнокристалічних покриттів з високою корозійною стійкістю. Додавання до складу електроліту іонів вольфрамату з подальшим включенням вольфраму до складу покриття додатково підвищує твердість та корозійну стійкість металічного осаду.

На відміну від водних електролітів, в електроліті на основі реліну осадження відбувається з більшою перенапругою та меншим виходом за струмом. Отримані покриття є більш напруженими та мають нижчу

корозійну стійкість. В той же час, такі покриття мають більш розвинену структуру поверхні, що робить їх перспективними для використання в процесах електрохімічного отримання водню.

Список літератури:

1. Nickel plating handbook <https://surl.li/qdkxyr>
2. Nickel Plating by George Di Bari in the ASM Handbook, Volume 5, Surface Engineering, published by ASM International, Materials Park, OH 44073, 1994, page 201 <https://surl.li/ifuxfv>
3. Gamburg Y.D., Zangari G. Theory and Practice of Metal Electrodeposition. *New York: Springer*. 2011. p. 385
4. Azmi S., Koudahi M.F., Frackowiak E. Reline deep eutectic solvent as a green electrolyte for electrochemical energy storage applications. *Energy Environ. Sci.* 2022. 15. P 1156–1171.
5. Zhong Z., Clouser S. J. Nickel–tungsten alloy brush plating for engineering applications. *Surface and Coatings Technology*. 2014. V. 240. P. 380–386.
6. Abbott A. P., et al. A Comparative Study of Nickel Electrodeposition Using Deep Eutectic Solvents and Aqueous Solutions. *Electrochimica Acta*. 2015. V.176. P. 718–726.
7. Winiarski J., et al. Ni/cerium Molybdenum Oxide Hydrate Microflakes Composite Coatings Electrodeposited from Choline Chloride: Ethylene Glycol Deep Eutectic Solvent. *Materials*. 2020. V. 13. P. 924–941.
8. Qadr G., et al. Nickel electrodeposition from deep eutectic solvents containing copper ions at a high temperature. *Journal of Molecular Liquids*. 2023. V. 378, 121584
9. Costovici S., Manea A.-C., Visan T. Anicai L. Investigation of Ni-Mo and Co-Mo alloys electrodeposition involving choline chloride based ionic liquids. *Electrochimica Acta*, 2016. V. 207, P. 97–111.
10. Uschapovskiy D.Yu., Zabaluyev A.S., Vorobyova V.I., Vasiliev G.S., Linyucheva O.V. Influence of the solvent nature on the electrodeposition of Ni and Ni-W coatings, *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky*. 2023. 34 (73), 2. P. 46–51.
11. Zabaluyev, A., et al. Influence of the electrolyte composition and the solvent nature on the physical-mechanical characteristics of nickel-based galvanic coatings. *Technical Sciences and Technology*. 2023. V. 3 (33). P. 170–179.
12. Wu H., et al. Double-Site Ni–W Nanosheet for Best Alkaline HER Performance at High Current Density >500 mA cm⁻². 2019. V. 6(10). P. 1900308

Zabaluyev A.S., Ushchapovskiy D.Yu., Vorobyova V.I., Vasilyev G.S., Linyucheva O.V. ELECTROCHEMICAL, MECHANICAL AND CATALYTIC PROPERTIES OF NICKEL-BASED GALVANIC COATINGS

The electrochemical characteristics and multifunctional properties of nickel-based coatings obtained from aqueous citrate and electrolytes based on a deep eutectic solvent (DES) – reelin have been investigated. Based on IR spectroscopic studies conducted using a Bruker Tensor II spectrometer, the formation of a low-temperature eutectic solvent corresponding to reelin has been shown.

Based on potentiodynamic current-voltage measurements, during the investigation of the electrodeposition of nickel coatings, it has been shown that the main factor influencing the overvoltage of metal release is temperature. It was found that increasing the potential scanning rate does not lead to the appearance of clearly pronounced maximums of the limiting current inherent in the controlling diffusion stage. This, on the one hand, may be associated with the masking effect of the side process of hydrogen release. On the other hand, this may be a consequence of the predominant control of the dissociation stage of complex ions based on nickel. The corresponding is inherent in both aqueous citrate and reelin-based nickel plating electrolytes.

It was found that the lowest corrosion rate and the highest microhardness are expected to be observed for nickel and nickel-tungsten coatings obtained from aqueous citrate electrolytes.

The article reveals that coatings obtained from electrolytes based on deep eutectic solvents are corrosion-unstable in chloride environments. The relatively high rates of corrosion damage can be explained by the peculiarities of the crystal structure, the presence of cracks and decomposition products of the reelin-based electrolyte in the coating.

It has been shown that the lowest hydrogen evolution overvoltage is observed on coatings obtained from the reelin-based electrolyte. This is the result of the formation of coatings with a nano-ordered and highly developed surface structure.

Key words: nickel-based coating, low-temperature eutectic solvent, implementation diagrams, microhardness, corrosion resistance, electrocatalytic properties.

Іванченко А.В.

Дніпровський державний технічний університет

Сокол О.Д.

Дніпровський державний технічний університет

ОДЕРЖАННЯ ХІМІЧНО АКТИВОВАНИХ СОРБЕНТІВ ІЗ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ТА ЇХ ВИПРОБУВАННЯ ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ БАРВНИКІВ ЗІ СТІЧНИХ ВОД

У роботі вирішено актуальне завдання розробки сорбентів, які здатні ефективно вилучати барвники зі стічних вод. Використання вторинної сировини, зокрема шкаралупи волоського горіха, яка містить значну частку лігніну, целюлози та геміцелюлози, робить її перспективною основою для створення таких сорбційних матеріалів.

Створено методику отримання хімічно активованих сорбентів із шкаралупи волоського горіха шляхом поетапної кислотної та лужної хімічної активації. Одержано три зразки лігноцелюлозного сорбенту на основі шкаралупи волоського горіха; активація проводилася із застосуванням 20 % розчинів неорганічних мінеральних кислот H_2SO_4 , HNO_3 , H_3PO_4 при кімнатній температурі протягом 1 години. Матеріал промивали до нейтрального рН (7–8) та повторно висушували. Для покращення властивостей сорбент додатково обробляли 20 % розчином луку КОН.

Одержано експериментальні результати дослідження ефективності вилучення метилового оранжевого із модельних розчинів. У процесі сорбції застосовано витрату сорбенту 1 г/дм^3 , початкова концентрація барвника становила 100 мг/дм^3 . Виявлено оптимальний час контактування сорбенту зі стоками 20 годин. З'ясовано, що сорбент, активований нітратною кислотою, проявляє найбільш ефективну сорбцію метилового оранжевого, що складає 95 %. Ефективна сорбція барвника метилового оранжевого на кислотно активованому сорбенті вірогідно протікає завдяки великій кількості функціональних груп на поверхні сорбенту та розвиненій пористій структурі.

Окрему увагу приділено екологічним аспектам процесу хімічної активації, зокрема утилізації рідких стоків, що утворюються під час процесу хімічної обробки лігноцелюлозної сировини. Реакція між калій гідроксидом КОН та неорганічними мінеральними кислотами дозволяє отримувати калійні солі (калій сульфат, калій нітрат, калій фосфат), які використовуються як добрива у сільському господарстві. Це сприяє мінімізації негативного впливу процесу на довкілля та забезпечує вторинне використання побічних продуктів.

Запропонована технологічна схема одержання сорбентів, що включає технологічні операції: підготовку сировини, хімічну активацію, нейтралізацію побічних продуктів та отримання готового сорбенту й добрив. Використання автоматизованих систем і багатоступеневої обробки забезпечує високу ефективність процесу та придатність технології для промислового застосування. Отримані результати свідчать про перспективність використання хімічно активованих сорбентів із вторинної сировини для очищення стічних вод, що містять барвники, водночас сприяючи раціональному використанню природних ресурсів і зменшенню екологічного навантаження.

Ключові слова: хімічна активація, лігноцелюлоза, метиловий оранжевий, водне очищення, очищення стічних вод, сорбція, шкаралупа волоського горіха, хімічна активація, карбонізація, добрива, екологічна ефективність.

Постановка проблеми. Зростання антропогенного навантаження на довкілля, зокрема на водні системи, є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності. Інтенсивна діяльність промислових підприємств, особливо текстильних, та харчових виробництв, призводить до значного забруднення стічних вод органічними та неорганічними сполуками, серед яких барв-

ники становлять окрему категорію. Барвники здатні накопичуватися в водоймах, та створювати токсичний вплив на водні екосистеми. Одним із перспективних методів очищення є використання сорбентів, здатних вилучати поллютанти зі стоків. Особливу увагу привертає можливість використання вторинної сировини для отримання хімічно активованих сорбентів. Вторинні матеріали, такі

як відходи сільського господарства, деревини, чи інші органічні відходи, мають значний потенціал як сировинна база для виробництва ефективних та екологічно безпечних сорбентів. Це не лише сприяє вирішенню проблеми утилізації відходів, але й дозволяє зменшити залежність від первинних ресурсів.

Однак, традиційні підходи до активації сорбентів передбачають використання агресивних хімічних реагентів, таких як концентровані кислоти чи луги, що створює додаткові екологічні виклики, адже їхня неконтрольована утилізація може спричинити додаткове навантаження на довкілля. Тому важливо розробляти технології, які забезпечують мінімізацію токсичних побічних продуктів активації та сприяють ефективному очищенню водних систем.

Постановка завдання. Мета дослідження – одержати хімічно активовані сорбенти із вторинної сировини та випробувати їх для вилучення барвників зі стічних вод.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основну роль у підвищенні адсорбційних характеристик сорбентів відіграють процеси карбонізації та активації. Сучасні дослідження зосереджені на оптимізації цих процесів, а також на пошуку інноваційних методів активації для забезпечення максимальної ефективності сорбентів. Карбонізація є початковим етапом обробки вихідної сировини, під час якого органічні матеріали піддаються термічному розкладу в умовах низького доступу кисню. Цей процес сприяє видаленню летких компонентів, концентруванню вуглецю та створенню базової пористої структури [1].

Температура та час карбонізації є критичними параметрами, які впливають на розмір пор та питомий об'єм сорбенту. Оптимальна температура для багатьох біоматеріалів, таких як лушпиння рису чи шкаралупа горіхів, становить 400–600 °C. Наприклад, карбонізація лушпиння рису при 500 °C протягом 2 годин призводить до формування мезопористої структури, яка є ефективною для адсорбції органічних барвників [2]. Активація є наступним етапом, який визначає адсорбційні властивості отриманого сорбенту. Основні методи активації поділяються на хімічну, фізичну та комбіновану. Хімічна активація передбачає обробку сировини активуючими реагентами, такими як фосфатна кислота (H_3PO_4), цинк хлорид (ZnCl_2), або калій гідроксид (KOH), що сприяють дегідратації органічної сировини, утворенню мікро- та мезопор і створенню активних функціональних груп на поверхні сорбенту. Застосування KOH як

активуєчого реагента дозволяє досягти питомої поверхні понад 2000 m^2/g , що робить такі сорбенти надзвичайно ефективними у вилученні барвників. Прикладом є активація шкаралупи горіхів KOH , яка демонструє адсорбцію метиленового синього до 400 mg/g . Фізична активація включає термічну обробку в інертній атмосфері (наприклад, нітроген чи аргон) або із застосуванням оксидантів, таких як водяна пара чи CO_2 . Цей метод дозволяє розширити пористу структуру, одночасно зберігаючи екологічність процесу [3].

Доведено, що фізична активація при використанні водяної пари сприяє формуванню мезопористої структури, яка є ефективною для адсорбції великих молекул, таких як барвники. Наприклад, обробка стебел кукурудзи парою при температурі 800 °C забезпечує створення пор із діаметром 2–50 нм, що значно підвищує сорбційну здатність. Комбінована активація об'єднує хімічний та фізичний підхід, що дозволяє досягти синергетичного ефекту [4].

Попередня хімічна активація фосфатною кислотою із подальшою термічною обробкою при 700 °C забезпечує створення матеріалів із подвійною системою мікро- та мезопор. Комбінована активація забезпечує універсальну адсорбційну здатність, дозволяючи ефективно очищати стічні води, які містять різні типи барвників [5].

Однак, одним із недоліків хімічної активації лігноцелюлозної сировини є утворення токсичних відходів, що потребує розробки ефективних технологій їх утилізації.

Виклад основного матеріалу. Хімічна активація шкаралупи волоського горіха є перспективним методом створення сорбентів із покращеними адсорбційними властивостями, які ефективно використовуються для очищення водних ресурсів від токсичних органічних і неорганічних забруднень. Завдяки високому вмісту лігніну (25–30 %), целюлози (35–40 %) і геміцелюлози (20–25 %), шкаралупа волоського горіха має значний потенціал для використання як основа сорбційного матеріалу [6].

Методика хімічної активації включала кілька етапів. Спочатку шкаралупу промивали дистильованою водою для видалення механічних домішок і висушували у сушильній шафі за температури 120 °C протягом 1 години. Після висушування матеріал подрібнювали та класифікували, відбираючи фракції розміром 2–3 мм, що забезпечувало однорідність подальшої обробки. На наступному етапі проводили хімічну активацію із застосуванням кислот. Матеріал обробляли 20 %

розчином активатора (H_2SO_4 , HNO_3 або H_3PO_4) при співвідношенні сорбенту до розчину 1:2 (маса до об'єму). Активацію виконували за кімнатної температури протягом 1 години при постійному перемішуванні. Після активації матеріал ретельно промивали дистильованою водою до досягнення нейтрального рН (7–8) і висушували при температурі 120°C [7].

Для подальшого покращення адсорбційних властивостей проводилася додаткова обробка калій гідроксидом (KOH). Сорбент просочували в 20 % розчині KOH у співвідношенні 1:2 (сировина до розчину) та перемішували протягом 1 години при кімнатній температурі. Після обробки сорбент промивали дистильованою водою.

Рідкі стоки, що утворюються під час процесу хімічної активації, збираються в окрему ємність для подальшої утилізації. Реакції між гідроксидом калію (KOH) та кислотами, використаними в процесі активації, призводять до утворення відповідних солей і води.

Отримані солі (калій сульфат K_2SO_4 , калій нітрат KNO_3 та калій фосфат K_3PO_4 є цінними добривами, які можуть використовуватися в сільському господарстві. Вони забезпечують рослини необхідними елементами живлення, такими як калій, нітроген і фосфор, сприяючи підвищенню врожайності та сталому розвитку аграрного сектору. Отриманий калій сульфат (K_2SO_4) може бути використаний як добриво, оскільки є цінним джерелом калію, необхідного для росту та розвитку рослин. В результаті утворюється калій нітрат (KNO_3), також відомий як калієва селітра. Ця сполука широко застосовується як азотно-калійне добриво в сільському господарстві, що сприяє підвищенню врожайності [8].

Заключним етапом була карбонізація (або піроліз), під час якої матеріал нагрівали до 800°C . Цей процес сприяв термічній деструкції органічних сполук, збільшенню вмісту карбону до 95 %, та формуванню вторинних пористих структур. Саме ці структури забезпечували високу адсорбційну здатність отриманих сорбентів, що робить їх ефективними для очищення води від забруднень [9].

Така методика демонструє високу екологічну ефективність, дозволяючи використовувати відходи як цінний ресурс для створення високоякісних сорбційних матеріалів.

Експериментальна частина

З метою визначення найбільш ефективного сорбенту та оптимальних технологічних параметрів для його промислового застосування, отриманим сорбентам виконували експериментальні дослідження з визначення ефективності видалення метилового

барвника. Для оцінки ефективності видалення метилового оранжевого проведено серію експериментальних досліджень. Початкова концентрація барвника в модельному розчині становила 100 мг/дм^3 , а витрата сорбенту 1 г/дм^3 . Сорбція тривала 24 години, при постійному перемішуванні на магнітних мішалках для забезпечення рівномірного контакту сорбенту з барвником. Відбирались проби об'ємом 1 мл кожні 4 години протягом доби для аналізу ступеня видалення барвника. Концентрацію метилового оранжевого у зразках визначали за допомогою фотометричного методу, вимірюючи оптичну густину розчину при довжині хвилі 464 нм [10].

На основі отриманих даних побудовано графік залежності залишкової концентрації метилового оранжевого від часу адсорбції.

На рис. 1 представлено результати дослідження ефективності сорбентів, активованих різними хімічними реагентами, для вилучення барвника зі стічних вод.

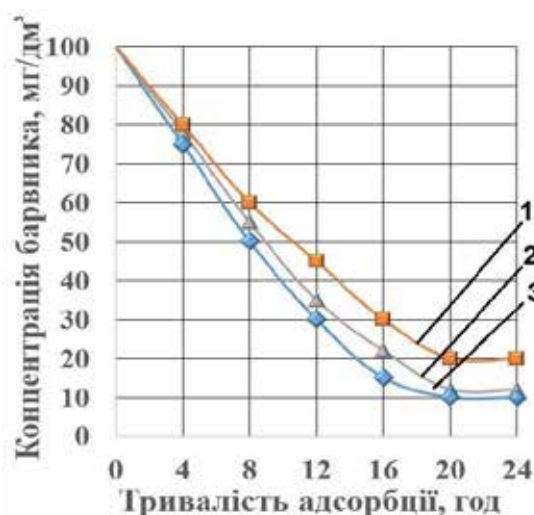


Рис. 1. Залежність залишкової концентрації метилового оранжевого від часу адсорбції при витраті сорбенту 1 г/дм^3 : 1 – сорбент лігноцелюлозний активований H_2SO_4 ; 2 – сорбент лігноцелюлозний активований H_3PO_4 ; 3 – сорбент лігноцелюлозний активований HNO_3

При витраті сорбенту 1 г/дм^3 після 12 годин контактування сорбент, активований нітратною кислотою (HNO_3), знижує концентрацію барвника з 100 мг/дм^3 до 30 мг/дм^3 ; активований фосфатною кислотою (H_3PO_4) – до 35 мг/дм^3 , а активований сульфатною кислотою (H_2SO_4) – до 45 мг/дм^3 .

При збільшенні часу контактування до 20–24 годин спостерігається подальше зниження залишкової концентрації барвника. Активований

нітратною кислотою HNO_3 – до 10 мг/дм^3 , H_3PO_4 – до 12 мг/дм^3 ; для H_2SO_4 – 20 мг/дм^3 .

Найефективнішим серед досліджених методів активації є сорбент, активований нітратною кислотою (HNO_3) демонструє найвищу ефективність видалення, досягаючи 95 % видалення барвника після 24 годин. Така ефективність може бути пов'язана з утворенням на поверхні сорбенту великої кількості функціональних груп (здебільшого карбоксильних), які активно взаємодіють із молекулами барвника. Формуванню пористої

структури сорбенту, яка забезпечує високу площу поверхні для адсорбції.

Сорбенти активовані H_2SO_4 та H_3PO_4 демонструють поступовий характер адсорбції з досягненням максимальної ефективності ближче до кінця досліду (20–24 години). Це може свідчити про більш повільне насичення активних центрів. Промислове використання сорбенту активованого нітратною кислотою є найбільш перспективним для застосування в промислових масштабах через його високу швидкість і ефективність видалення барвників.

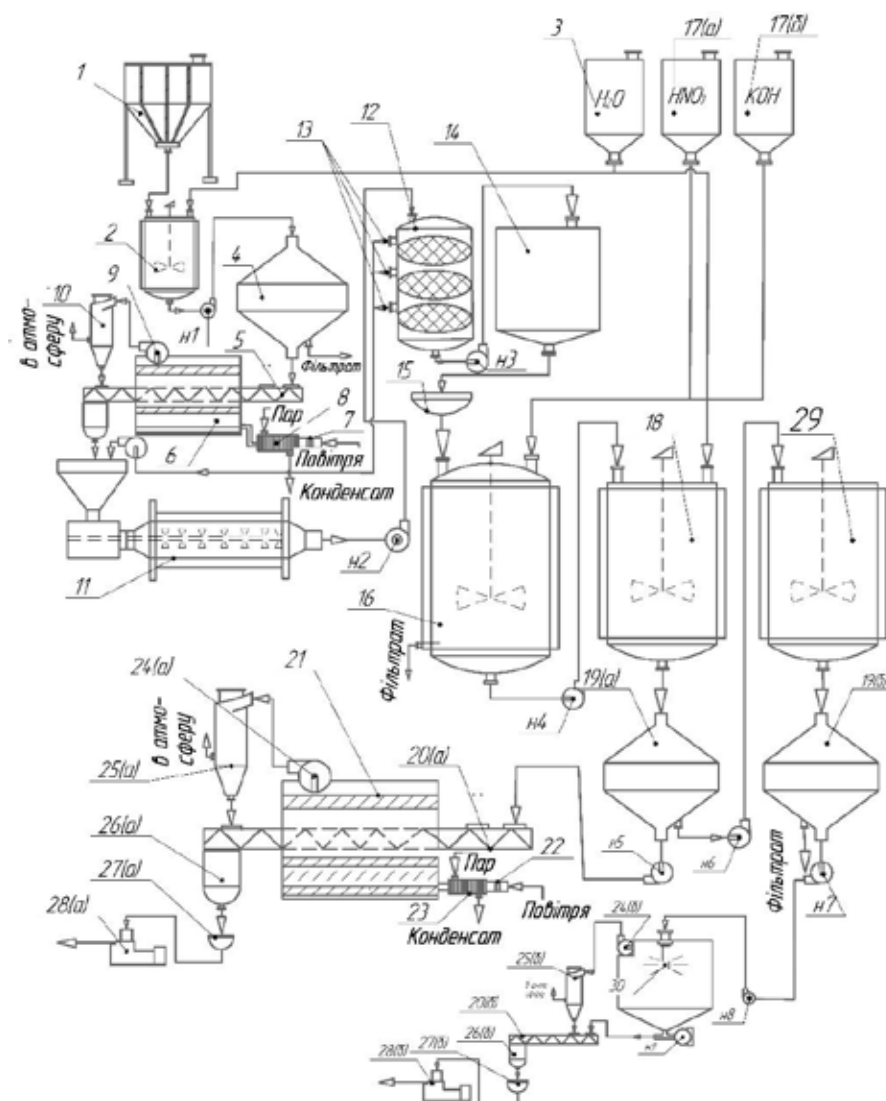


Рис. 2. Технологічна схема хімічної активації сорбенту та утилізації фільтрату у добрива

1 – збірник сировини; 2 – промивна установка; 3 – збірник дистильованої води; 4 – сепаратор; 5 – шинковий транспортер; 6 – стрічкова сушарка; 7 – повітряний фільтр; 8 – паровий калорифер; 9 – вентилятор; 10 – циклон; 11 – дробильна установка; 12, 13 – розподільна система; 14 – збірник; 15 – автоматичні ваги; 16 – змішувач; 17(a), (б) – збірник з активатором; 18 – промивна установка; 19(a), (б) – сепаратор; 20(a), (б) – шинковий транспортер; 21 – муфельна піч; 22 – повітряний фільтр; 23 – паровий калорифер; 24 – повітряний фільтр; 25(a), (б) – циклон; 26(a), (б) – збірник висушеного сорбенту; 27(a), (б) – автоматичні ваги; 28(a), (б) – автомат для фасування; 29 – змішувач відпрацьованого активатора; 30 – сушарка Н1 – Н9 – насос

На основі експериментальних досліджень розроблено технологічну схему одержання кислотно активованого лігноцелюлозного сорбенту, яка організована наступним чином. Сировину (шкарлупу горіха) завантажують до збірника (1), де вона зберігається та поступово подається до промивної установки (2). Після цього до сировини подається дистильована вода (3) для видалення домішок і пилу. Надалі суміш нагнітають насосом (Н1) у сепаратор (4). Фільтрат, що відділяється під час сепарування, утилізується. Після цього сировина потрапляє на шнековий транспортер (5), а потім на стрічкову сушарку (6). Повітря для сушіння продукту з атмосфери поступає у повітряний фільтр (7), де його очищують від механічних забруднень, і передається до парового калорифера (8), де повітря нагрівається гострою парою до температури 100 °С.

Відпрацьоване повітря під час сушіння перекачується вентилятором (9) у циклон (10), де відбувається відділення часток сухого продукту від повітря. Очищене повітря викидається в атмосферу. Очищена та висушена сировина подається на дробильну установку (11), після чого суміш нагнітається насосом (Н2) до розподільної системи (12) для відсортування фракцій розміром 2–3 мм. Фракції більше 2–3 мм відсортовуються (13) та повторно подрібнюються (11).

Подрібнена сировина нагнітається насосом (Н3) до збірника (14). Далі поступово передається на автоматичні ваги (15) та у змішувач (16), куди подається 20 % розчин HNO_3 . Після першого етапу активації застосовується додаткова обробка матеріалу 20 % розчином KOH (17б). Активованний сорбент нагнітається насосом (Н4) до промивної установки (18) куди подається дистильована вода (3) для промивання сировини. Суміш нагнітають у сепаратор (19а) фільтрат, що відділяється під час сепарування, утилізується у добрива.

Активованний сорбент нагнітається насосом (Н5) на шнековий транспортер (20), а потім до муфельної печі (21). Повітря для карбонізації продукту з атмосфери поступає у повітряний фільтр (22), де його очищують від механічних забруднень, і передається до парового калорифера (23). Відпрацьоване повітря, в процесі карбонізації, перекачується вентилятором (24) у циклон (25а), де відбувається відділення часток сухого продукту від повітря. Очищене повітря викидається в атмосферу. Готовий сорбент після (21) подається на шнековий транспортер (20). Разом з цим, на шнековий тран-

спортер (20а) подають виділені частки сухого продукту з циклону (25а). Шнековий транспортер (20а) перекачує продукт у збірник висушеного сорбенту (26а), де продукт зберігається та порційно подається на автоматичні ваги (27а). На автоматичних вагах (27а) відбувається зваження адорбенту та передача у автомат для фасування (28а). Фільтрат що та утворився в процесі активації (HNO_3 , та KOH) нагнітається насосом (Н6) у змішувач (29) де відбувається нейтралізація реагентів з утворенням кристалів калієвої селітри далі суміш подається на сепаратор 19(б) після чого с нагнітається насосом (Н7,8) до сушарки (30). Відпрацьоване повітря, в процесі сушки, перекачується вентилятором (24б) у циклон (25б), де відбувається відділення часток сухого продукту від повітря. Очищене повітря викидається в атмосферу. Отримане добриво нагнітаються насосом (Н9) на шнековий транспортер (20б). Разом з цим, на шнековий транспортер (20б) подають виділені частки сухого продукту з циклону (25б). Шнековий транспортер (20б) перекачує продукт у збірник висушеного добрива (26б), де він зберігається та порційно подається на автоматичні ваги (27б). На автоматичних вагах (27б) відбувається зваження та передача у автомат для фасування (28б) [10].

Далі партія упаковок адсорбенту, та добрива, що пройшла контроль, відвантажується на склад.

Висновки. Одержано хімічно активовані сорбенти на основі шкарлупи волоського горіху. Активацію волоського горіху здійснено за участі хімічних агентів. Оптимальна методика активації, яка включає обробку 20 % розчинами H_2SO_4 , HNO_3 , H_3PO_4 та додаткову обробку KOH із подальшою карбонізацією при 800 °С, забезпечує створення сорбентів із розвиненою пористою структурою. Експериментальні дослідження підтвердили, що сорбенти активовані HNO_3 , мають найвищу ефективність у видаленні метилового оранжевого (до 95 %), завдяки великій кількості функціональних груп на поверхні та високій площі адсорбції. Рідкі стоки, що утворюються під час активації, ефективно нейтралізуються калій гідроксидом із утворенням калійних солей (K_2SO_4 , KNO_3 , K_3PO_4), які можуть використовуватися як добрива. Запропонована технологічна схема є економічно вигідною, екологічно безпечною та адаптованою для промислового впровадження, а отримані результати свідчать про перспективність використання хімічно активованих сорбентів.

Список літератури:

1. Marquez-Montesinos F., Cordero T., Rodríguez-Mirasol J., Rodríguez J. Powdered activated carbons from pinus caribaea sawdust. *Separation Science and Technology*. 2001. No. 36(14). С. 3191–3206.
2. Ковальчук А., Почечун Т., Галиш В., Трус І. Фосфорилування шкаралуп волоських горіхів для підвищення ефективності очищення водних розчинів. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2(12). С. 236–244.
3. Будзуляк І.М., Ващинський В.М., Рачій Б.І. Адсорбційні властивості пористих вуглецевих матеріалів, отриманих методом хімічної активації. *Журнал фізики та інженерії поверхні*. 2015. № 1 (13). С. 84–90.
4. Єлатонцев Д.О., Мухачев, А.П., Супрунчук В. І. Сорбент лігноцелюлозний зі шкарлупи волоського горіха. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. № 29 (1) С. 110–115.
5. Alaya M.N., Girgis B.S., Mourad W.E. Activated carbon from some agricultural wastes under action of one-step steam pyrolysis. *Journal of Porous Materials*. 2000. Vol. 7. P. 509–517.
6. Daoud, M., Benturki, O., Girods, P., Donnot, A., Fontana, S. Adsorption ability of activated carbons from phoenix dactylifera rachis and ziziphus jujube stones for the removal of commercial dye and the treatment of dyestuff wastewater. *Microchemical Journal*. 2019. No.148(3–4). P. 493–502.
7. Khokhotva O. The influence of dissolved organic carbon on sorption of heavy metals on urea-modified pine bark. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 173(1–3). P. 689–696.
8. Сокол О.Д., Воронов В.В., Іванченко А.В. Хімічна активація природних сорбентів і утилізація промислових вод у добрива. *The 5th International scientific and practical conference "Perspectives of contemporary science: theory and practice" (June 24–26, 2024), Lviv, Ukraine*. 2024. 368–371.
9. Sentorun-Shalaby C., UcakAstarlioglu M. G., Artok L., Sarici C. Preparation and characterization of activated carbons by one-step steam pyrolysis activation from apricot stones. *Microporous and mesoporous materials*. 2006. Vol. 88. P. 126–134.
10. Ivanchenko A.V., Soroka O.V., Sokol O.D. Removal ions of ferrum(III) and zinc from aqueous environments by chemically activated sorbents from natural raw materials. *Journal of Chemistry and Technologies. Oles Honchar Dnipro National University*. 31 (2). 2023. P. 344–352.

Ivanchenko A.V., Sokol O.D. PRODUCTION OF CHEMICALLY ACTIVATED SORBENTS FROM SECONDARY RAW MATERIALS AND THEIR TESTING FOR THE REMOVAL OF DYES FROM WASTEWATER

This study addresses the urgent task of developing sorbents capable of effectively removing dyes from wastewater. The use of secondary raw materials, particularly walnut shells, which contain significant amounts of lignin, cellulose, and hemicellulose, makes them a promising basis for creating such sorption materials.

A methodology for obtaining chemically activated sorbents from walnut shells has been developed through stepwise acidic and alkaline chemical activation. Three samples of lignocellulosic sorbents based on walnut shells were prepared. The activation was conducted using 20% solutions of inorganic mineral acids (H_2SO_4 , HNO_3 , H_3PO_4) at room temperature for 1 hour. The material was washed to achieve a neutral pH (7–8) and then dried again. To further enhance the properties of the sorbents, an additional treatment with a 20% KOH solution was applied.

Experimental results on the efficiency of removing methyl orange from model solutions were obtained. During the sorption process, a sorbent dose of 1 g/dm^3 was used, with an initial dye concentration of 100 mg/dm^3 . The optimal contact time between the sorbent and the wastewater was determined to be 20 hours. It was found that the sorbent activated with nitric acid exhibited the highest sorption efficiency for methyl orange, reaching 95%. The effective sorption of methyl orange on the acid-activated sorbent is likely attributed to the large number of functional groups on the surface and its well-developed porous structure.

Special attention was paid to the environmental aspects of the chemical activation process, particularly the utilization of liquid waste generated during the chemical treatment of lignocellulosic raw materials. The reaction between potassium hydroxide (KOH) and inorganic mineral acids produces potassium salts (potassium sulfate, potassium nitrate, potassium phosphate), which can be used as fertilizers in agriculture. This minimizes the negative environmental impact of the process and ensures the secondary use of by-products.

The proposed technological scheme for obtaining sorbents includes the following operations: raw material preparation, chemical activation, by-product neutralization, and the production of final sorbents and fertilizers. The use of automated systems and multi-stage processing ensures high process efficiency and the suitability of the technology for industrial applications. The results obtained confirm the feasibility of using chemically activated sorbents from secondary raw materials for cleaning wastewater containing dyes, while promoting the rational use of natural resources and reducing environmental impact.

Key words: Chemical activation, lignocellulose, methyl orange, sorption, water purification, wastewater treatment, sorption, walnut shell, chemical activation, carbonization, fertilizers, ecological efficiency.

UDC 542.97

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/25>

Ivaniuta S.P.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Ivanenko O.I.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Plashykhin S.V.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Abramova A.O.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

EVALUATING THE RISKS TO UKRAINE'S INFRASTRUCTURE IN A WARTIME CONTEXT

This study explores the assessment of risks for infrastructure objects in war conditions on Ukraine's territory. The article focuses on the main trends and changes in the damage to Ukrainian infrastructure caused by Russian military aggression, both at the regional and national levels. It includes an assessment of the risks of damage to infrastructure from artillery and missile attacks across various administrative regions of Ukraine. The regions were ranked based on the risk level associated with infrastructure losses in wartime conditions. The analysis utilized available statistical data to perform the risk assessment, adapting a model commonly used in EU countries. A risk matrix was developed to quantify direct infrastructure losses from artillery and missile attacks throughout the conflict. The matrix encompasses 16 different types of infrastructure facilities. Evaluations indicate a heightened risk for assets in industry, agriculture, education, and energy sectors. Meanwhile, assets related to the forest fund, trade, housing and communal services, culture, tourism, sports, healthcare, and transport face average risk. Other infrastructure types examined in this study, including administrative buildings, digital infrastructure, social services, and the financial sector, are classified as having a low risk of loss. The analysis of the risk of direct infrastructure losses from artillery and missile attacks over the year revealed that residential buildings and critical infrastructure are particularly vulnerable. The calculations indicated that two types of infrastructure are at exceptionally high risk for direct losses due to these attacks. The results show that direct damage to infrastructure objects from shelling during military operations can increase by more than two orders of magnitude compared to damage from emergencies of various origins in peacetime. The authors propose a methodology to assess the risks of damage to infrastructure from artillery and missile attacks at the level of administrative regions of Ukraine and to adapt the data to evaluate the risk of infrastructure objects according to the model used in EU countries.

Key words: risk, infrastructure, evaluation, wartime, environment, risk assessment, natural environment, contamination.

Formulation of the problem. The Russian military aggression against Ukraine has not only caused widespread destruction of residential and critical infrastructure but has also severely disrupted the normal operations of numerous enterprises. This has resulted in an unprecedented decline in the quality of essential resources and a catastrophic ecological imbalance in the country's natural environment. Across various regions of Ukraine, the challenges associated with waste management, hazardous chem-

ical substances, and environmental preservation are worsening, leading to excessive pollution of soil and water resources and the disruption of landscapes and nature conservation areas.

The destruction of sewage and water treatment systems has caused a significant increase in toxic substances such as zinc, copper, chromium, lead, cadmium, and others in natural water bodies. This contamination has made providing quality water to certain regions' populations impossible. Additionally,

complications have arisen in the operation of nuclear energy facilities in Ukraine, including the Zaporizhzhya nuclear power plant, due to damage and disruptions to critical energy infrastructure. These factors contribute to an increased threat to environmental safety, which includes cross-border implications.

The extensive destruction and deterioration of vital environmental components caused by the war necessitate a significant reevaluation of the existing methodology in Ukraine for assessing the ecological damage resulting from military operations. Since the beginning of the conflict, the destruction of residential and communal infrastructure has occurred due to both direct hostilities and targeted missile and artillery strikes aimed at critical facilities essential for civilian life.

Analysis of recent research and publications.

As a result of shelling and active combat, some cities have experienced destruction exceeding 80%. Preliminary estimates suggest that failing infrastructure facilities cost at least \$110 billion. The estimated damage to housing alone amounts to over 50 million square meters. The impact extends to educational and healthcare institutions, housing and communal enterprises, administrative buildings, bridges, crossings, and transport infrastructure.

According to the "Russia Will Pay" project, the total direct damage from the destruction of housing and infrastructure in just six months of full-scale war amounts to \$108.3 billion, or 2.9 trillion hryvnias. During this period, at least 129,900 residential buildings were damaged, resulting in losses of \$47.7 billion. Notably, 38% of these buildings were destroyed beyond possible restoration. The damage to the housing stock is unevenly distributed among regions, with the Donetsk, Luhansk, Kharkiv, and Kyiv regions collectively accounting for over 82% of the total damage in Ukraine. In addition, the infrastructure sector incurred losses of \$31.6 billion, destroying 2,217 educational institutions, 903 medical facilities, and 89 social institutions.

The recording and assessment of the destruction and the direct damage caused by it are ongoing. However, the indicators obtained can only be considered preliminary and are subject to continuous updates and revisions, typically reflecting increased estimates. Additionally, the experience of partially restoring residential infrastructure in the recently liberated territories highlights the importance of including estimates for total damage costs. This should account for expenses related to the dismantling and disposal of debris and the loss of essential equipment, particularly that of water treatment facilities,

heating points, and the vehicle fleet for housing and communal services.

Adopting the approach proposed by the World Bank to assess restoration costs effectively is advisable. This approach combines losses from destruction, defined as the cost of constructing new residential, social, and infrastructure facilities on the sites of the destroyed ones, with economic losses stemming from the broader impact of hostilities – these indirect losses may even surpass direct losses. Current assessments rely on directly recording and analysing reports from authorities, local governments, the media, and citizens about the damage, thus providing only a descriptive evaluation of losses.

Current data from the World Bank highlights the significant economic losses from military actions affecting various infrastructure facilities in Ukraine [1]. Research into emerging trends and the nature of threats – military and otherwise – globally indicates that the risk of such occurrences is rising [2]. This analysis reviews critical approaches to assessing risks from different threats to infrastructure in Ukraine [3, 4] and around the world [5–7]. The findings reveal a substantial increase in threats and a decrease in the security levels of many critical infrastructure objects in Ukraine, primarily due to artillery and missile attacks by Russian forces. These attacks have caused widespread destruction and disrupted the operation of various infrastructure types [8, 9]. Moreover, the analysis of relevant publications points out that the destruction and damage to critical infrastructure, including energy companies, water treatment facilities, chemical plants, and agricultural enterprises, pose a severe threat to the population's and the environment's safety.

Research in the field of prevention and countermeasures against various threats indicates that protecting the population and the environment from natural, man-made, and military hazards requires a risk-oriented approach. This approach is essential for effectively preventing and reducing the risk of dangerous incidents at infrastructure facilities [10, 11]. Additionally, it is necessary to recognize that the intensification of ecological and man-made threats, exacerbated by war, leads to significant issues such as the pollution of river basins and groundwater and the destruction of landscapes and protected natural areas. These factors greatly diminish the population's safety in regions experiencing active military operations in Ukraine.

In today's world, there are increased physical risks stemming from military aggression, natural disasters, and climate change. These factors contribute to a rise

in the frequency and intensity of extreme weather events and lead to long-term shifts in average climate conditions. If adequate precautions are not taken, this can diminish the capacity and effectiveness of certain types of infrastructure. Furthermore, there is some uncertainty surrounding the identification of critical infrastructure since the relevant sectors and categories of entities are not consistently recognized as essential across all EU member states [12, 13].

Actions taken by EU member states to identify and enhance the resilience of critical entities should follow a risk-based approach that prioritizes those entities best suited to perform essential social functions or economic activities. Each Member State must assess relevant natural and anthropogenic risks within an agreed framework to ensure this targeted strategy. This assessment should consider cross-sectoral and cross-border risks that could impact the delivery of essential services. These risks may include accidents, natural disasters, security emergencies, health crises such as pandemics, hybrid threats, and other antagonistic threats like terrorism, criminal infiltration, and sabotage.

In the year since the beginning of the full-scale Russian military invasion, the total amount of direct documented damage to residential and non-residen-

tial real estate and other infrastructure amounted to more than \$143.8 billion in replacement value. Since the beginning of the full-scale invasion on February 24, 2022, Russia has fired almost 5,000 missiles on the territory of Ukraine [14].

In the first weeks of the war, from the end of February to the beginning of March, combat operations were conducted on the territory of 10 regions. As of this time of year, hostilities continue in the Kharkiv, Luhansk, Donetsk, Kherson, and Zaporizhzhia regions. The most affected in terms of direct losses of infrastructure are the administrative areas of Ukraine in which hostilities were directly conducted: Donetsk, Kharkiv, Luhansk, Mykolaiv, Zaporizhzhya, Kyiv, and Chernihiv regions Fig. 1 [9].

Among the cities that suffered the most during the war, such as Maryinka, Mariupol, Irpin, Kharkiv, Chernihiv, Severodonetsk, Lysychansk, Vugledar, Sumy, Rubizhne, Izyum, Mykolaiv, Bakhmut, and Volnovakha can be singled out. The continuation of the aggression of the Russian Federation throughout 2022 and at the beginning of 2023 led to an increase in the amount of damage caused both by missile strikes on the country's infrastructure, especially in the energy sector, and by shelling of cities and towns, active military operations in the south and east of Ukraine.

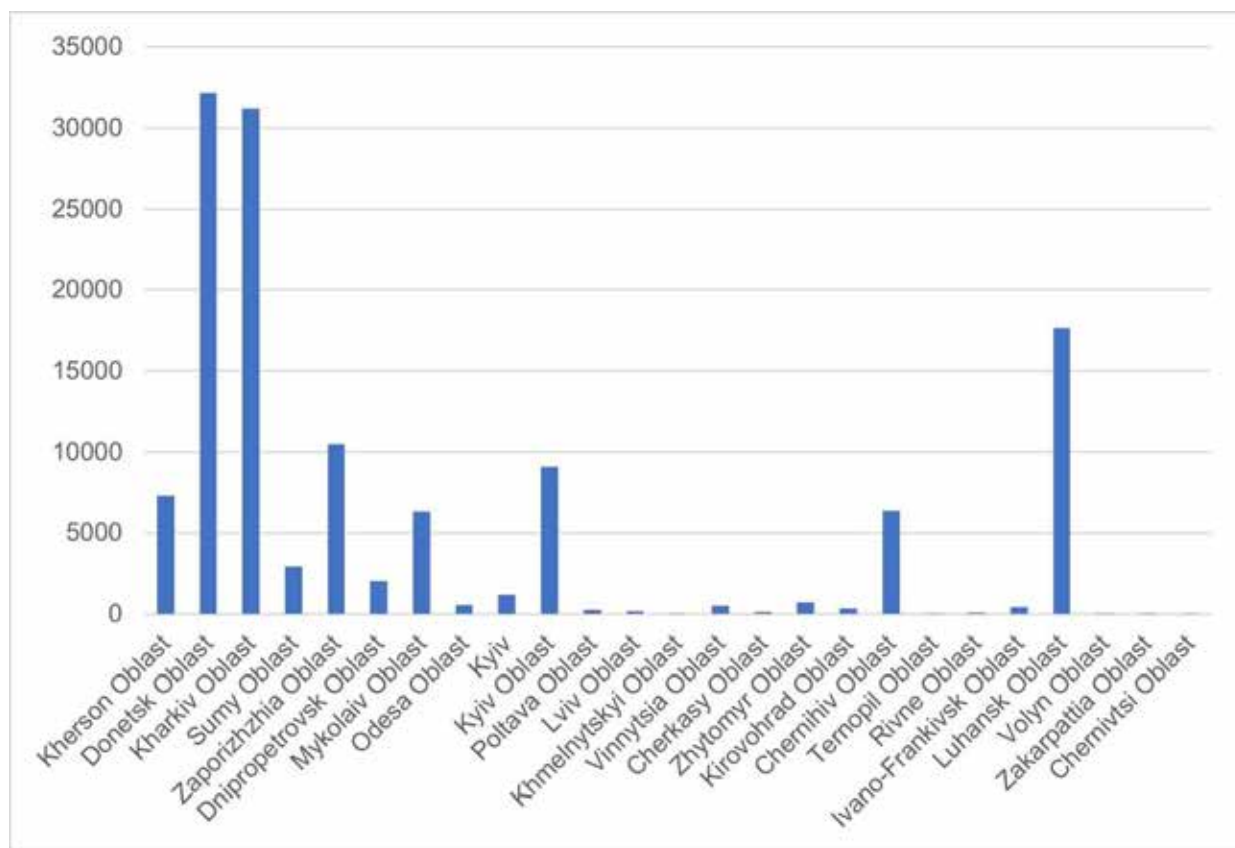


Fig. 1. Direct losses of the infrastructure of Ukraine from February 2022 to March 2023, million dollars [9]

Task statement. The purpose of the article is to analyze the regional characteristics of losses of infrastructure objects from war, to assess the risks of damage to infrastructure from artillery and missile attacks at the level of administrative regions of Ukraine, to adapt the available data and to assess the risk of direct losses of infrastructure from artillery and missile attacks during the year of the war for various types of infrastructure facilities.

The research tasks are to assess the risks of damage to infrastructure from artillery and missile attacks at the level of administrative regions of Ukraine, adapt data and use them to evaluate the risk of infrastructure objects according to the model used in EU countries, build an appropriate risk matrix of infrastructure losses from artillery and missile attacks, and assess its level.

The choice of research methodology is primarily due to the need to overcome the uncertainty that arises during decision-making on protecting critical infrastructure objects in war conditions. It is also related to Ukraine's foreign policy course towards European integration and the need to introduce and adapt modern approaches to risk assessment used in the EU to domestic conditions. In addition, it is necessary to consider the difficulty of obtaining the required data on critical infrastructure objects to conduct such an assessment in military operations.

Outline of the main material of the study. The article considers critical infrastructure as an asset, object, equipment, network, or system or a part of an asset, object, equipment, network, or system necessary to provide essential services [15]. Critical service means a service that is critical to the maintenance of vital societal functions, economic activity, public health and safety, or the environment.

Risk is considered in the article as the possibility of loss or disruption caused by an incident, which can be expressed as a combination of the magnitude of such loss or disruption and the likelihood of the occurrence. An incident is considered an event that can potentially disrupt or significantly disrupt the provision of critical services. It is evident that in war conditions, missile and artillery attacks, which cause the most significant losses to infrastructure objects, are considered incidents.

Risk assessment at work is considered a general process of determining the nature and extent of risk by identifying and analyzing the potentially relevant threats, vulnerabilities, and hazards that could lead to an incident and assessing the potential loss or failure of critical service caused by this incident.

In general, risk assessment includes several stages:

- identification of risks as a process of their recognition and description;
- risk analysis, which involves understanding the nature of the risk and determining its level;
- risk assessment involves comparing risk analysis results with criteria to determine whether the risk is acceptable or permissible.

Suppose the task of prevention and preparedness for a specific type of threat is solved. In that case, the risk can be quantified as a function of the likelihood of the occurrence of the danger, exposure (the total cost of all elements exposed to risk), and vulnerability (the specific effect of the exposure) [6]. At the same time, the risk of loss and damage to infrastructure facilities in the event of incidents during the year can be determined according to [16] as:

$$R_T = \sum_{i=1}^n P_{Ti} (V_{T1i} \cdot L_{T1i} \cdot N_{T1i} + V_{T2i} \cdot L_{T2i} \cdot N_{T2i}) = \sum_{i=1}^n P_{Ti} \left(\frac{N_{T1i}}{N_{Ti}} \cdot L_{T1i} \cdot N_{T1i} + \frac{N_{T2i}}{N_{Ti}} \cdot L_{T2i} \cdot N_{T2i} \right), \quad (1)$$

Where P_{Ti} is the likelihood of the i -th incident with losses for the infrastructure facilities of the particular region; V_{T1i} – is the vulnerability of infrastructure objects to destruction from the i -th incident; V_{T2i} – the vulnerability of infrastructure objects to damage from the i -th incident; N_{T1i} – the number of destroyed infrastructure facilities during the i -th incident; N_{T2i} – the number of damaged infrastructure objects as a result of the i -th incident; N_{Ti} – the total number of infrastructure facilities in this region; L_{T1i} – losses from the destruction of infrastructure facilities; L_{T2i} – losses from damage to infrastructure facilities as a result of the i -th incident.

At the same time, in EU countries, it is recommended to use a 5 x 5 risk matrix to visualise the assessment results when conducting a national risk assessment for critical infrastructure (Fig. 2) [6].

Risk assessment should be based on three impact categories: adverse consequences for people (population), economy (and environment), and political and social consequences. For the first two impact categories, the negative consequences are quantified as the number of dead (injured) persons or economic losses in UAH (Euro). Implications for the third category of influence, regarding social and political interrelationships, are determined through qualitative indicators.

In the European Union, each country must carry out a risk assessment for each category of consequences and accordingly build three different risk matrices when carrying out a risk assessment for

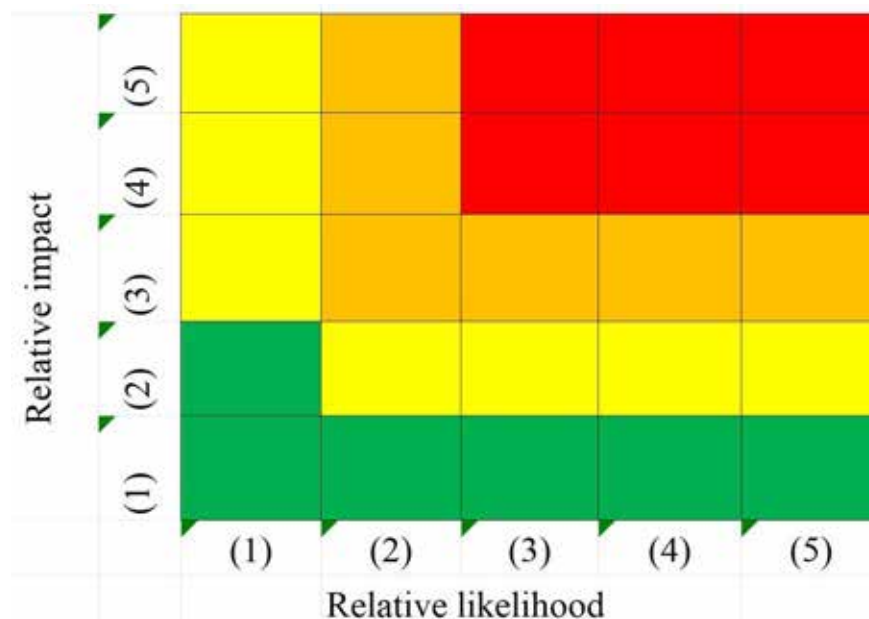


Fig. 2. Example of risk matrix (green – low level, yellow – average level, orange – above average level, red – high level)

critical infrastructure. Among all threats of various origins to the security of critical infrastructure, the following are identified as the most important [5]:

- natural: floods, extreme weather events, forest fires, earthquakes, epidemics and pandemics, epizootics;
- technogenic: a) non-malicious: industrial accidents, nuclear/radiological accidents, transport accidents, loss of critical infrastructure; b) malicious: cyber-attacks, terrorist attacks.

In this work, the risk of direct infrastructure losses from missile and artillery strikes at the regional level was assessed according to the data of the Kyiv School of Economics and the Ukrainian Helsinki Human Rights Association regarding the losses of various types of infrastructure and the volume of missile and artillery shelling in the regions of Ukraine [9, 14].

At the same time, the likelihood of occurrence of dangerous situations and the possibility of losses from them are calculated based on the specified statistical data. On this basis, the corresponding risk of infrastructure losses from missile and artillery strikes is determined, which was done to solve the purpose of this publication (Fig. 2). The likelihood of artillery and missile strikes was defined as the ratio of the number of attacks in the corresponding region of the country to their total number in Ukraine, which occurred during the year of the war (Fig. 3).

The results of the calculations indicate that the highest likelihood of artillery and missile attacks is

observed in the Donetsk, Zaporizhzhia, Kharkiv, Kherson, Chernihiv, and Luhansk regions.

Considering the obtained results of the assessment of the likelihood of artillery and missile attacks, the risk of direct infrastructure losses from missile and artillery attacks was further assessed, missile attacks, exposure, and the corresponding impact in the form of economic losses (Fig. 4).

The assessment results show that for almost all regions of the country, there is a risk of damage to the infrastructure by Russian shelling. At the same time, the highest level of risk of infrastructure losses from missile and artillery fire in the regions of Ukraine is noted in the Kharkiv and Donetsk regions. A high level of risk is characteristic of the Zaporizhzhia, Luhansk, Kherson, Chernihiv, and Mykolaiv regions. The average level of risk of infrastructure losses from rocket and artillery fire is noted for the Kyiv, Dnipropetrovsk, Sumy, Odesa, and Zhytomyr regions. The low level of risk mainly refers to the Cherkasy, Poltava, Vinnytsia, Lviv, Ivano-Frankivsk, and Khmelnytsky regions.

An analysis of the data on direct losses by infrastructure type shows that the most significant increase is due to the increase in losses of the housing stock. Thus, this amount increased to \$53.6 billion over the past three months in February 2023 [9].

At the same time, it should be noted that the three most affected areas, in addition to the destruction of the housing sector, include the infrastructure area, with losses amounting to \$36.2 billion, and industry

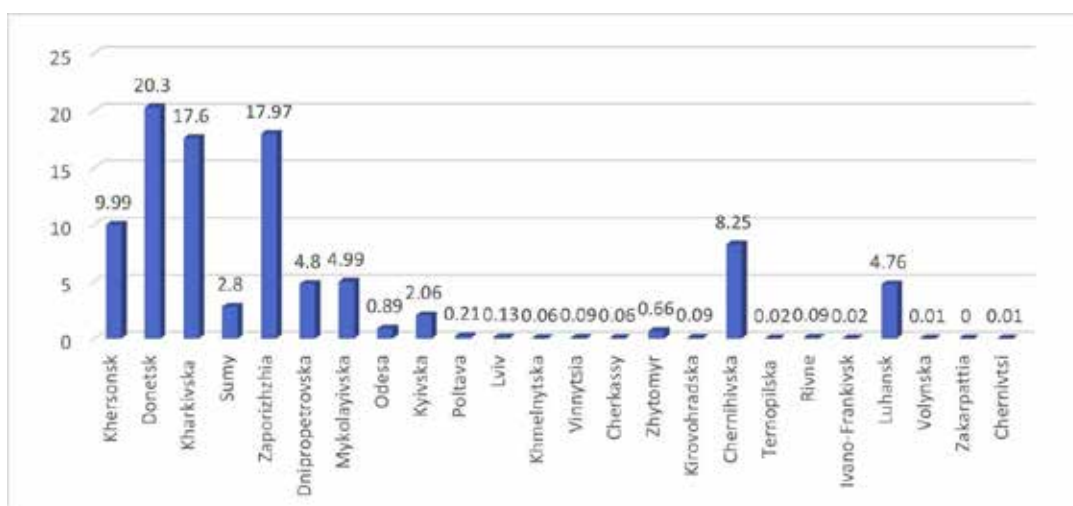


Fig. 3. Likelihood of artillery and missile strikes in the regions of Ukraine, %

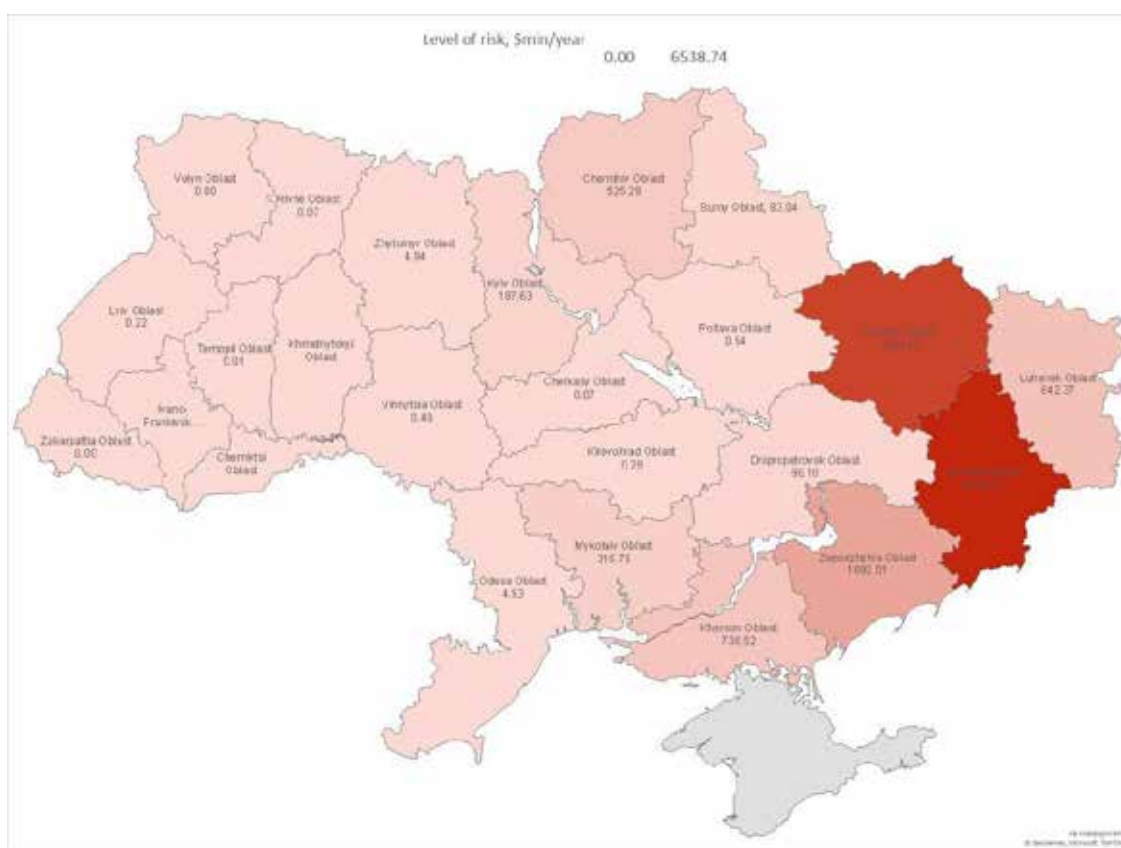


Fig. 4. The risk of infrastructure losses from missile and artillery fire in the regions of Ukraine

and damaged enterprises – for \$11.3 billion. Another \$8.9 billion was destroyed and damaged by Russian educational institutions in which Ukrainians, pupils, and students from other countries studied. Damages caused to land resources and agriculture during the active phase of armed aggression from February 24, 2022, are estimated at \$8.7 billion.

Compared to the beginning of June 2022, there was a significant increase in the number of destroyed

and damaged infrastructure objects: from 121,000 to 153,000 objects, the number of residential objects affected by the war increased from 777 to 1,216 – medical facilities, from 111 to 630 – administrative buildings, from 105.2 thousand to 207.5 thousand – private cars.

The tactics of massive missile and drone attacks on Ukrainian energy facilities, which Russia began to use in October 2022, led to the fact that direct losses

in the energy sector are already estimated at \$8.1 billion, the central part of which fell on the electric power industry.

The risk of infrastructure losses by category is assessed according to the Kyiv School of Economics data regarding the formation of direct losses for various infrastructure objects. Thus, a risk matrix is constructed. At the same time, the likelihood of dangerous events and the possibility of economic losses from them are calculated based on statistical data. On this basis, the corresponding dependence is formed, which was done to solve the purpose of this publication (Fig. 3). The likelihood of the occurrence of dangerous events (missile and artillery strikes) was determined as the ratio of the number of such events for the corresponding type to their total number that occurred during the period from February 2022 to March 2023 (Table 1).

The assessment results indicate that residential buildings, infrastructure facilities, the energy industry, and the agricultural sector are characterized by the greatest likelihood of infrastructure losses in Ukraine. At the same time, residential buildings, infrastructure facilities, enterprise assets, and industry are characterized by the highest likelihood of shelling.

Considering the results obtained in assessing the likelihood of missile and artillery attacks and losses of various types of infrastructure, the EU model constructed a risk matrix (Fig. 5).

It is important to note that residential buildings and critical infrastructure facilities typically face a high risk of direct losses. Enterprises in sectors such as industry, agriculture, education, and energy also

have an increased level of risk. In contrast, assets related to the forest fund, trade, housing and communal services, culture, tourism, sports, health care, and transport are considered to have an average level of risk.

Other types of infrastructure objects considered in this study, including administrative buildings, digital infrastructure objects, the social sphere, and the financial sector, are characterized by low risk.

In management decisions aimed at reducing losses from various types of shelling, it is crucial to focus primarily on preventing and lessening risks to residential buildings and critical infrastructure.

In war conditions, conducting risk assessments for critical infrastructure requires modern statistical data analysis methods, probability theory, and risk analysis to validate the confidence of the obtained research results.

In the context of military operations and the complex interrelationships among critical factors that contribute to threats to infrastructure, an effective risk reduction process will require the simultaneous implementation of multiple strategies. These strategies may include enhancing the protection of infrastructure and duplicating essential functions to ensure their continuity.

In the context of Russian military aggression against Ukraine, there is a growing threat of decreasing security levels, which hampers the operation of many critical infrastructure facilities. This situation arises from missile and artillery attacks, leading to severe risks of destruction and damage. An analysis of the main trends and changes

Table 1

Risk assessment of infrastructure losses by category

№	Type of infrastructure	Likelihood of losses	Likelihood of shelling	Risk category
1	Residential buildings	0.373	0.254	5
2	Critical infrastructure	0.252	0.371	5
3	Enterprise assets, industry	0.079	0.062	4
4	Education	0.062	0.076	4
5	Agrarian-industrial complex and land resources	0.061	0.059	4
6	Energy	0.056	0.061	4
7	Forest fund	0.031	0.032	3
8	Vehicles	0.022	0.017	3
9	Trade	0.018	0.022	3
10	Utilities	0.01	0.01	2
11	Culture, tourism, sports	0.015	0.012	2
12	Health care	0.012	0.015	2
13	Administrative buildings	0.004	0.004	1
14	Digital infrastructure	0.004	0.004	1
15	Social sphere	0.001	0.001	1
16	Financial sector	0.0001	0.0001	1

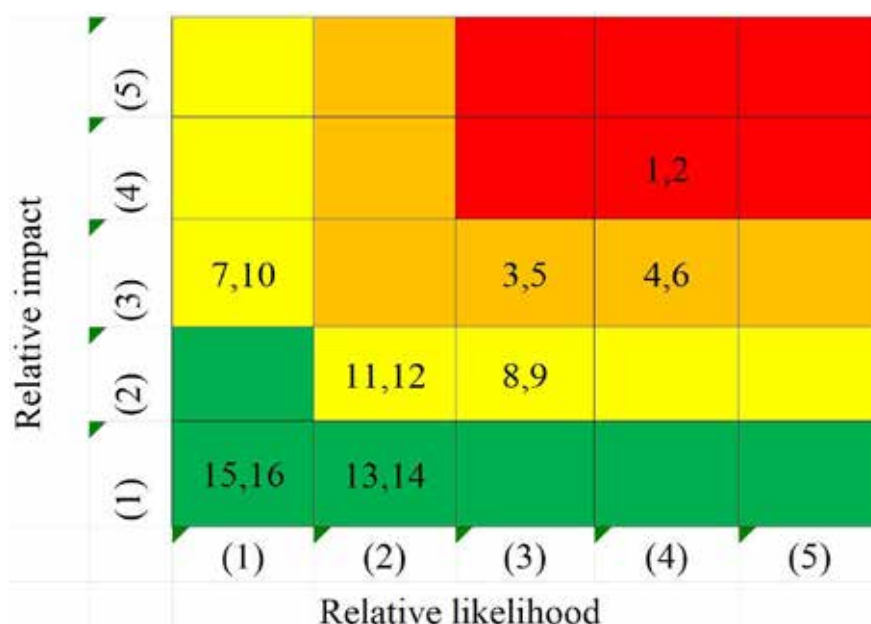


Fig. 5. Risk matrix of direct infrastructure losses from artillery and missile strikes during the year of the war:
 1 – Residential buildings; 2 – Critical infrastructure; 3 – Enterprise assets, industry; 4 – Education;
 5 – Agrarian-industrial complex and land resources; 6 – Energy; 7 – Forest fund; 8 – Vehicles; 9 – Trade;
 10 – Utilities; 11 – Culture, tourism, sports; 12 – Health care; 13 – Administrative buildings; 14 – Digital infrastructure; 15 – Social sphere; 16 – Financial sector

in infrastructure losses across Ukraine during the war—at both regional and national levels—reveals a significant vulnerability of these facilities to missile and artillery strikes. Infrastructure in regions of Ukraine that border the Russian Federation and are in areas of active military operations are particularly affected.

Conclusions. The findings indicate that assessing risks for infrastructure in wartime should differ from evaluations made during peacetime. Data reveals that during military operations, the likelihood of damage and destruction to infrastructure significantly increases, mainly due to rocket and artillery fire. Furthermore, the direct damage to infrastructure from shelling during military operations can be more than 100 times greater than the damage caused by various emergencies in peacetime.

The assessment of the risks to infrastructure from artillery and missile attacks across Ukraine's administrative regions indicates that nearly all areas of the country face a threat from Russian attacks. The highest risk of infrastructure damage from missile and artillery fire is observed in the Kharkiv and Donetsk regions. Additionally, the Zaporizhia, Luhansk, Kher-

son, Chernihiv, and areas of Mykolaiv also exhibit a significant risk to various types of infrastructure.

The analysis of the risk of direct infrastructure losses from artillery and missile attacks over the year revealed that residential buildings and critical infrastructure are particularly vulnerable. Evaluations indicate a heightened risk for assets in industry, agriculture, education, and energy sectors. Meanwhile, assets related to the forest fund, trade, housing and communal services, culture, tourism, sports, healthcare, and transport face average risk. Other infrastructure types examined in this study, including administrative buildings, digital infrastructure, social services, and the financial sector, are classified as having a low risk of loss.

Future exploration in this area primarily hinges on a comprehensive assessment of the damages sustained by infrastructure due to the war. This assessment will facilitate a risk evaluation of various types of Ukrainian infrastructure at regional and national levels. It will also involve categorizing these infrastructures by type and level of risk and developing appropriate measures to mitigate potential threats that could result in significant negative impacts on critical infrastructure facilities.

Bibliography:

1. Ukraine – Rapid Damage and Needs Assessment: February 2022–2023 (English). Washington, D.C.: World Bank Group. URL: <https://surl.li/qvltto> (date of application: 15.03.24).
2. Munich Re. Natural disaster risks, rising trend in losses 2013–2022. URL: <https://www.munichre.com/en/risks/natural-disasters.html> (date of application: 11.09.24)

3. Ivaniuta S. Priorities for reducing the risks of emergencies in the context of critical infrastructure protection, *Strategic priorities*, 2017. № 4 (45). P. 43–54.
4. Ivanenko O. Implementation of risk assessment for critical infrastructure protection using risk matrix, *Science Rise*, 2020. № 2. P. 26–38. DOI:10.21303/2313-8416.2020.001340
5. Bobro D. G., Ivaniuta S. P., Kondratov S. I., Sukhodolya O. M. Organizational and legal aspects of ensuring the safety and stability of the critical infrastructure of Ukraine, Kyiv. 2019. 224 p.
6. Theocharidou M, Giannopoulos G. Risk assessment methodologies for critical infrastructure protection. Part II: A new approach, Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2015. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/621843> (date of application: 10.10.24)
7. Commission staff working document overview of natural and man-made disaster risks in the EU. Jan 2014, E Commission, "Commission staff working document overview of natural and man-made disaster risks in the EU," Brussels, 8.4.2014. WD (2014). 134 p.
8. Ivaniuta S. Development of risk assessment methodology for emergency losses in the regions of Ukraine, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 3(6). P. 48–53. DOI:10.15587/1729-4061.2015.43070
9. Kyiv School of Economics Report on the direct damage to the infrastructure from the destruction caused by Russia's military aggression against Ukraine a year after the start of the full-scale invasion, 2024. URL: <https://surl.li/puqmxk> (date of application: 09.12.24)
10. Ivaniuta S., Kachinsky A. Ecological and natural-technogenic safety of Ukraine: a regional dimension of threats and risks: monograph, National Institute of Strategic Research, Kyiv. 2012. 308 p.
11. Critical Infrastructure Protection and Uncertainty Analysis. In book: Handbook of Disaster Risk Reduction & Management, Chapter 8. Publisher: World Scientific Editors: Christian N Madu, Chu-Hua Kuei. 2017. P. 193-223. DOI:10.1142/9789813207950_0008
12. Johansson J, Hassel H, Zio E. Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures: Comparing two approaches in the context of power systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 2013. № 120: 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.027>
13. Labaka L, Hernantes J, Sarriegi JM. A holistic framework for building critical infrastructure resilience, *Technological Forecasting and Social Change*. 2016. № 103. P. 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.11.005>
14. Statistics from the T4P Global Initiative War Crimes Database. Ukrainian Helsinki Union for Human Rights. URL: <https://t4pua.org/1200> (date of application: 18.12.24)
15. Directive (EU) 2022/2557 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 on the resilience of critical entities and repealing Council Directive 2008/114/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj> (date of application: 11.11.24)
16. Fairman R. et al. Environmental Risk Assessment – Approaches, Experiences, and Information Sources: Environmental issues report 4, Prepared at Monitoring and Assessment Research Centre, King's College, London. EEA : Copenhagen, Denmark, 1999–2011.

Іванюта С.П., Іваненко О.І., Плашихін С.В., Абрамова А.О. ОЦІНКА РИЗИКУ ДЛЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ВОЄННОГО ЧАСУ

Досліджено оцінку ризиків для об'єктів інфраструктури в умовах війни на території України. У статті розглядаються основні тенденції та зміни шкоди українській інфраструктурі, завданої російською військовою агресією, як на регіональному, так і на національному рівнях. Він включає оцінку ризиків ураження інфраструктури від артилерійських і ракетних обстрілів у різних адміністративних областях України. Регіони ранжовано за рівнем ризику, пов'язаного з втратою інфраструктури в умовах воєнного часу. Аналіз використовував доступні статистичні дані для проведення оцінки ризику, адаптувавши модель, яка зазвичай використовується в країнах ЄС. Було розроблено матрицю ризиків для кількісного визначення прямих втрат інфраструктури від артилерійських і ракетних атак протягом усього конфлікту. Матриця охоплює 16 різних типів інфраструктурних об'єктів. Оцінки вказують на підвищений ризик для активів у промисловості, сільському господарстві, освіті та енергетиці. Водночас середньому ризику піддаються активи лісового фонду, торгівлі, житлово-комунального господарства, культури, туризму, спорту, охорони здоров'я, транспорту. Інші типи інфраструктури, розглянуті в цьому дослідженні, включаючи адміністративні будівлі, цифрову інфраструктуру, соціальні послуги та фінансовий сектор, класифікуються як такі, що мають низький ризик втрат. Аналіз ризику прямих втрат інфраструктури від артилерійських і ракетних обстрілів протягом року показав, що особливо вразливими є житлові будинки та критична інфраструктура. Розрахунки показали, що два типи інфраструктури мають надзвичайно високий ризик прямих втрат

через ці атаки. Результати показують, що прямі збитки об'єктів інфраструктури від обстрілів під час військових дій можуть зрости більш ніж на два порядки порівняно зі збитками від надзвичайних ситуацій різного походження в мирний час. Авторами запропоновано методiku оцінки ризиків ураження інфраструктури від артилерійсько-ракетних обстрілів на рівні адміністративних областей України та адаптації даних для оцінки ризиків об'єктів інфраструктури за моделлю, яка використовується в країнах ЄС.

Ключові слова: ризик, інфраструктура, оцінка, воєнний час, довкілля, оцінка ризику, природне середовище, забруднення.

Коваль М.Г.

Черкаський державний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАРБУВАННЯ БАВОВНЯНИХ ТКАНИН ПРЯМИМИ БАРВНИКАМИ ІЗ ПОВТОРНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ОЧИЩЕНИХ СТИЧНИХ ВОД

Текстильна промисловість споживає велику кількість води і виробляє величезну кількість стічних вод, які мають негативний вплив на загальну екосистему. Актуальною є розробка економічно ефективних та екологічних підходів до належного очищення промислових стічних вод фарбувального виробництва з доцільним їх повторним використанням в технологічних процесах текстильного виробництва.

У статті представлені результати експериментальних досліджень можливості повторного використання очищеної адсорбційним методом з подальшою коагуляцією та флокуляцією стічної води фарбувального виробництва (за допомогою природного сорбенту цеоліту) в процесі фарбування бавовняних тканин прямими барвниками трьох основних кольорів: Прямого синього Direct B2RL, Прямого червоного світлостійкого, Прямого жовтого світлостійкого К. Процес фарбування тканини здійснено в умовах реального фарбувально-опоряджувального виробництва ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» (ПрАТ «ЧШК», м. Черкаси, Україна). Досліджено, що повторне використання очищеної стічної води в технології фарбування бавовняної тканини Бязь (артикул 3461) забезпечує інтенсивність забарвлення тканини на рівні 95-98% у порівнянні з еталоном (100%), для бавовняної тканини Віскоза (артикул 3324) інтенсивність забарвлення складає 96-99%. Стійкість одержаних забарвлень до сухого тертя, прання з використанням мила та дії «поту» на рівні 2-4 балів. З метою визначення кількості досліджуваних циклів очищення одного й того ж об'єму води з подальшим фарбуванням, експериментальним шляхом визначено, що двократне очищення однієї і тієї ж стічної води дозволяє використовувати її для фарбування тканини Бязь (артикул 3461) барвниками Прямим синім Direct B2RL і Прямим червоним світлостійким та для фарбування тканини Віскоза (артикул 3324) барвником Прямим жовтим світлостійким К (інтенсивність забарвлення пофарбованої тканини 95-98%, кольорова відмінність досліджених зразків має значення $DE < 2$ між еталонними та пофарбованими зразками, якісні показники досліджених зразків знаходяться в межах еталонних).

Результати експериментальних досліджень слугуватимуть для створення ресурсозберігальної технології фарбування текстильних матеріалів із повторним використанням очищеної стічної води.

При виконанні дослідження та обробці експериментальних даних застосовано методи фізико-хімічного аналізу, спектрофотометричний метод, методи математичного аналізу та сучасну обчислювальну техніку, табличний процесор MS Excel.

Ключові слова: фарбувальне виробництво, стічна вода, очищення стічних вод, адсорбція, цеоліт, прямі барвники, бязь, віскоза.

Постановка проблеми. Текстильна промисловість є однією з найбільш водомістких галузей у світі. Світове щорічне споживання води в текстильній та швейній промисловості оцінюється приблизно в 79 мільярдів кубометрів. У процесі текстильного виробництва близько 80% використаної води скидається у вигляді стічних вод [1], що становить 20% глобального забруднення води, будучи другим за величиною забруднювачем після нафтової промисловості [2]. Процеси фарбування та фінішної обробки текстилю характеризуються високим споживанням води за рахунок кількох циклів прання та полоскання. У процесі фарбування тканини близько 150 м³ води витрачається в середньому на кожну тону обробленого

полотна, що значно загострює проблему використання та нестачі прісної води [3].

Процес фарбування текстильних матеріалів є важливим етапом текстильного виробництва. На цьому етапі волокнам (тканині) надається колір шляхом використання текстильних барвників і додаткових хімічних речовин, які створюють певне середовище та забезпечують процес адсорбції між барвником і волокном. Після процесу фарбування частина барвників і хімікатів знаходиться в складі утворених стічних вод. Ці барвники та хімічні речовини, крім їх неприйняттого зовнішнього вигляду та токсичного ефекту після їх розпаду, можуть забруднювати прилеглий ґрунт, поверхневі води, стаючи серйозною глобальною

проблемою забруднення навколишнього середовища. Очищення текстильних стоків необхідне для захисту екосистеми та забезпечення подальшої переробки очищених стоків для повторного використання в процесах текстильної фабрики.

Тож, з метою уникнення негативного впливу на навколишнє середовище, здоров'я людей і природних водних ресурсів, а також зменшення значного споживання води в текстильній промисловості, актуальним є розробка економічно ефективних та екологічних підходів до належного очищення промислових стічних вод фарбувального виробництва з доцільним їх повторним використанням в технологічних процесах текстильного виробництва.

Повторне використання води є важливим аспектом сталого управління водними ресурсами, особливо коли це робиться для покращення місцевого водопостачання та зниження виробництва стічних вод [4]. Однак вода, що використовується в текстильній обробці, особливо на етапі фарбування, повинна відповідати більш жорстким вимогам до якості, ніж та, що застосовується для скидання в навколишнє середовище [5]. Отже, щоб повторне використання очищених стічних вод було економічно вигідним, необхідно розробити ефективні процеси очищення, спрямовані не тільки на видалення кольору і органічної речовини, але і на відновлення солей та інших складових [6]; такі процеси, які призводять до очищення стічних вод з максимальною якістю, необхідною для повторного використання [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Повторне використання води, отриманої в результаті обробки текстильних стоків з використанням адсорбентів в нових процесах фарбування, збільшується через високий відсоток води, яка може бути повторно використана для фарбування тканин [8]. У літературі найбільш часто описуються випадки очищення води, спрямовані на кінцеву утилізацію стоків, без перевірки можливості повторного використання їх на одному і тому ж виробничому підприємстві [9].

У роботі [10] показана можливість електроокислення стічних вод фарбувального виробництва з використанням алмазного анода, легованого бором, що забезпечує необхідну для повторного використання якість очищених стічних вод. Результати двох виконаних циклів фарбування вовняної (100%) саржевої тканини кислотними барвниками Nylosan з повторним використанням очищеної стічної води показали, що ефективне послідовне повторне використання може бути

досягнуто з використанням води помірної якості. Електроокислення призвело до зниження екотоксичності стічної води до 18,6 разів, що дозволило повторно використовувати очищені стічні води без значного накопичення екотоксичності.

Пакистанські вчені [11] оцінили ефективність процесу електрокоагуляції для знебарвлення синтетичних стічних вод, утворених після фарбування реактивним барвником Reactive Yellow 145. Очищені стічні води використовували повторно для восьми наступних циклів змивання при фарбуванні текстилю. Оптимізація параметрів процесу (час електролізу, густина струму та pH) дозволила досягти максимальної ефективності видалення забарвлень (98%) при pH 7, тривалості обробки 10 хвилин та щільності струму 90 А/м². Значення різниці кольорів для всіх зразків пофарбованих тканин становили від 0,38 до 0,85, що є промислово прийнятною межею якості ($\Delta E_{cmc} < 1$). Стійкість до прання та міцність забарвлення також були порівняні з властивостями традиційно випраних зразків тканин.

Метою дослідження, описаного в роботі [12], була оцінка кількості циклів повторного використання фарбувальних ванн, оброблених пероксидазою хрону, для процесу фарбування бавовни реактивними барвниками. Ензимна обробка стічної води дозволила видалити колір на 99%, але залишкові домішки у ваннах негативно впливали на результати фарбування бавовни реактивними барвниками, тому необхідним було розбавлення дистильованою водою при коефіцієнтах розбавлення 70, 80 і 90%, досягаючи прийнятних різниць у кольорі (ΔE) 0,94, 0,73 і 0,52 відповідно. На фарбування партії 200 кг бавовняної тканини економія води становила близько 200-600 л.

У рамках дослідження [13], спрямованого на переробку/повторне використання утворених стічних вод, у фарбуванні бавовняної тканини використовувалися реактивні барвники Reactive Yellow 176, Reactive Red 241 та Reactive Blue 221. Стічні води були знебарвлені за допомогою H₂O₂, каталізованого ультрафіолетовим світлом (UV). Ефективність знебарвлення UV/H₂O₂ стічних вод в 91% відбувалася при pH 4. Повторне використання стічних вод було досліджено загалом трьома послідовними циклами очищення стічних вод. Якість бавовняної тканини, пофарбованої повторно використаними стічними водами, оцінювали за допомогою системи колірного простору CIELAB, тестування стійкості до світла та стійкості до прання. Результати показали, що

стічні води після обробки UV/H_2O_2 , можуть використовуватися протягом двох наступних циклів фарбування без зміни якості кольору пофарбованих бавовняних тканин. Запропонована обробка може заощадити воду та кухонну сіль, підвищуючи економічність процесу фарбування.

Огляд та аналіз досліджень багатьох науковців свідчить про необхідність вирішення циклічне використання стічної води, що призведе до зменшення кількості викидів токсичних речовин у навколишнє середовище, поліпшить стан довкілля та водних ресурсів, а також знизить собівартість готової текстильної продукції. Це є підставою для проведення лабораторних та виробничих досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження експериментальним шляхом можливості повторного використання стічної води фарбувального виробництва, очищеної адсорбційним методом з подальшою коагуляцією та флокуляцією, в технології фарбування бавовняних тканин прямими барвниками.

Виклад основного матеріалу. Очищенню з дослідженням можливого повторного використання підлягали усереднені розбавлені (1:100) стічні води діючого фарбувального виробництва ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» («ЧШК», м. Черкаси, Україна). В якості адсорбента використано природний цеоліт (сокирніт) Сокирницького родовища Закарпатської області (Україна) з розміром фракції 2,5-5,0 мм. Очищення стічних вод здійснено в такій послідовності [14, 15]:

– підготовка цеолітових глин (просіювання через сито, промивання, сушка та термічна активація). Термічна активація здійснювалася в муфельній печі типу СНОЛ – 1,6.2,5.1/9 – І4 шляхом прожарювання при температурі 450°C протягом 4,5 год;

– хімічна модифікація цеоліту, яка здійснювалася шляхом занурення адсорбенту в 10% розчин сульфатної кислоти за нормальних умов на 1 годину (об'ємне співвідношення 1:2 тверда фаза : розчин);

– очищення стічних вод термічно активованим та хімічно модифікованим цеолітом одним з найбільш поширених та ефективних способів адсорбції – тривалий контакт рідкої та твердої фаз у стані спокою: завантаження нерухомого шару цеоліту в об'єм стічної води, що очищується;

– коагуляція та флокуляція стічної води (коагулянт $Al_2(SO_4)_3$ (20 г/л), флокулянт $(C_6H_7O_6Na)_n$ (1%). Дослідження проводили з використанням постійно працюючої електричної мішалки з кількістю обертів 300 об/хв. Утворену суспензію відстоювали протягом 24 годин, фільтрували;

– фізико-хімічний аналіз очищеної стічної води та порівняння її з властивостями технологічної пом'якшеної води ПрАТ «ЧШК» (пом'якшення здійснюється за допомогою Катіоніту КУ-2-8 ГОСТ 20298-74 П.12 т.2) (табл. 1 [14]).

Так як колір барвників є наслідком їх взаємодії зі світлом, то кількісну оцінку кольоровості стічної та очищеної води здійснювали спектрофотометричним методом, використовуючи спектрофотометр UV-5800 PC (КНР). Результат фізико-хімічного аналізу очищеної стічної води

Таблиця 3

Колірні характеристики пофарбованих тканин Бязь (артикул 3461) та Віскоза (артикул 3324) прямими барвниками з використанням води, очищеної адсорбційним методом

Барвник	Тканина	Світлість DL	Відтінок (червоно-зелений) Da	Відтінок (жовто-синій) Db	Кольорова відмінність DE*	Інтенсивність забарвлення, % відповідно до еталону (100%)
Прямий синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	+0,13 світліший	-0,17 зеленіший	-0,21 синіший	0,71	98,7
	Віскоза (арт. 3324)	+0,32 світліший	-0,26 зеленіший	-1,20 синіший	1,28	96,8
Прямий червоний світлостійкий	Бязь (арт. 3461)	-0,36 темніший	+0,07 червоніший	+1,89 жовтіший	1,29	96,4
	Віскоза (арт. 3324)	+0,27 світліший	+0,32 червоніший	+0,14 жовтіший	0,58	97,3
Прямий жовтий світлостійкий K	Бязь (арт. 3461)	+0,44 світліший	-0,30 зеленіший	-1,16 синіший	1,64	95,6
	Віскоза (арт. 3324)	+0,02 світліший	+1,01 червоніший	+0,37 жовтіший	1,13	99,8

* Кольорова відмінність – математичне уявлення, що дає змогу чисельно виразити відмінність між двома кольорами в колориметрії. DE не має перевищувати 2, що приблизно відповідає мінімально помітній для людського ока відмінності між кольорами [18, с. 29-32].

підтверджує за показниками її відповідність до технологічної пом'якшеної води, а ступінь очищення стічної води становить 91% [14], що свідчить про можливість її використання в технології фарбування текстильних матеріалів та потребує подальших досліджень.

Повторне використання очищеної адсорбційним методом стічної води в технології фарбування тканини досліджувалося експериментально у виробничих умовах фарбувально-опоряджувального виробництва ПрАТ «ЧШК». Фарбування тканини Бязь (артикул 3461) та Віскоза (артикул 3324) барвниками трьох основних кольорів Прямим синім Direct B2RL, Прямим червоним світлостійким, Прямим жовтим світлостійким К здійснювали на лабораторній фарбувальній машині «АНІВА NUANCE CH-6015» (Datacolor, США).

Склад фарбувального розчину та умови фарбування наведені в таблиці 2.

За технологічним режимом підприємства у фарбувальний розчин занурюють 2 г бавовняної тканини. Фарбування здійснюється періодичним способом, при температурі 95°C протягом 40 хв. Після фарбування зразки промивають декілька разів холодною водопровідною водою та гарячою ($t = 80-90^{\circ}\text{C}$) водою, омилюють мийним препаратом PERLAVIN OSGB conc. (1-2 г/дм³) (виробництво Dr. PETRY, Німеччина), стійким в лужному середовищі протягом 10-15 хв, промивають гарячою та холодною водопровідною водою. Промиті зразки сушать у сушильній шафі при температурі 100°C протягом 5-7 хв. Одержані пофарбовані зразки тканин (Рис. 1, 2) досліджують на інтенсивність та стійкість забарвлення.

Таблиця 4

Якісні показники забарвлення пофарбованих тканин Бязь (артикул 3461) та Віскоза (артикул 3324) прямими барвниками

Барвник	Тканина	Стійкість забарвлення, бали					
		сухе тертя		прання з використанням мила		дія «поту»	
		Птв*	Ов*	Птв*	Ов*	Птв*	Ов*
Прямий синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	3	3	2	2	2	2
	Віскоза (арт. 3324)	3	2-3	2	3	3	3
Прямий червоний світлостійкий	Бязь (арт. 3461)	4	3-4	3	3	3	3
	Віскоза (арт. 3324)	4	3-4	3	3	3	3
Прямий жовтий світлостійкий К	Бязь (арт. 3461)	4	3-4	3	3	3	3
	Віскоза (арт. 3324)	4	3-4	3	3	3	3

*Птв** – фарбування з використанням пом'якшеної технологічної води

*Ов** – фарбування з використанням очищеної води

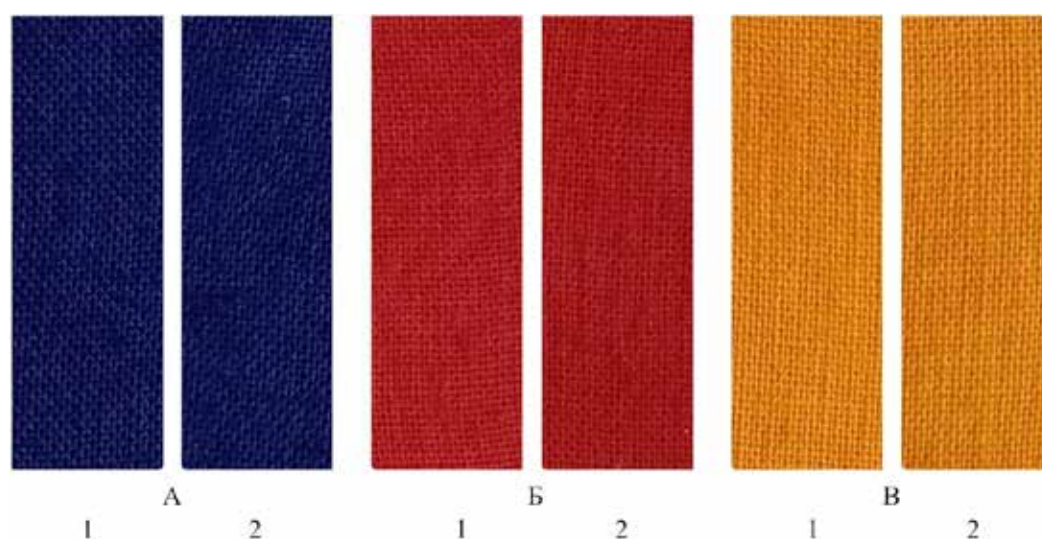


Рис. 1. Зразки пофарбованої тканини Бязь (арт. 3461) прямими барвниками: А – барвником синім Direct B2RL, Б – барвником червоним світлостійким, В – барвником жовтим світлостійким К: 1 – з використанням пом'якшеної технологічної води, 2 – з використанням води, очищеної адсорбційним методом

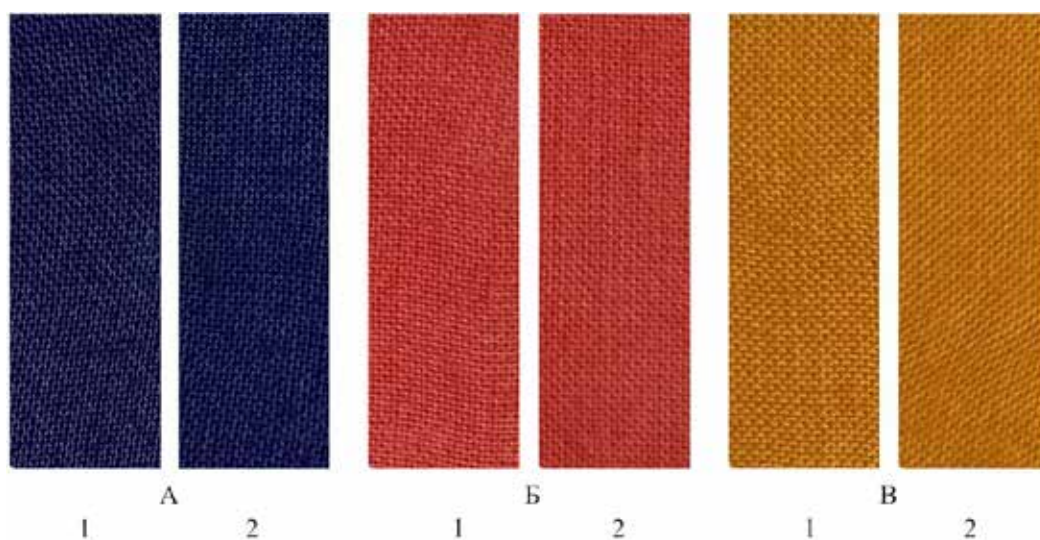


Рис. 2. Зразки пофарбованої тканини Віскоза (арт. 3324) прямими барвниками:
А – барвником синім Direct B2RL, Б – барвником червоним світлостійким, В – барвником жовтим світлостійким К: 1 – з використанням пом'якшеної технологічної води, 2 – з використанням води, очищеної адсорбційним методом

Для дослідження аналізу фарбувальних ванн та утвореної стічної води застосовували спектрофотометричний метод, використовуючи спектрофотометр UV-5800 PC (КНР). Колірні характеристики досліджуваних зразків тканини визначалися за допомогою автоматичної комп'ютерної системи об'єктивного вимірювання кольору «Datacolor Spectrum 400» (Datacolor США) за допомогою системи кольорного простору CIELAB і порівнювалися з кольірним стандартом для виробництва. Обчислювалася різниця в кольорі між досліджуваним зразком і стандартом, а потім порівнювалася з межами (допусками) прийнятності для споживача для кольорового продукту. Допуски прийнятності встановлюються між замовником, який встановлює вимогу до якості кольору і виробництвом, яке виконує це замовлення у вигляді готової продукції [17, с. 2]. Допуски прийнятності ПрАТ «ЧШК» для досліджуваних зразків (у порівнянні з виробничими еталонними): відхилення інтенсивності забарвлення до 5%, світлості (DL), відтінків Da (червоно-зеленого) і Db (жовто-синього) до ± 2 . Результати досліджень представлені в таблиці 3.

Якість та стійкість одержаних забарвлень визначалися шляхом їх порівняння з еталонними, якими слугували зразки ПрАТ «ЧШК» (табл. 4), та визначенням стійкості фарбування згідно з діючими державними стандартами України та міжнародними стандартами ISO (ДСТУ 3998-2000 [19], ДСТУ ISO 105-X12:2016 (до сухого тертя) [20], ДСТУ ISO 105-A02:2005 («Шкала сірих етало-

нів») [21], ДСТУ EN ISO 105-C10:2020 (прання з використанням мила) [22], дія «поту» ДСТУ ISO 11641:2012 «Тести на стійкість кольору. Стійкість кольору до потовиділення». Метод використовує розчин штучного потовиділення для імітації дії потовиділення людини. Оскільки потовиділення сильно варіюється від однієї людини до іншої, неможливо розробити метод з універсальною валідністю, але лужний розчин потовиділення, зазначений в ДСТУ ISO 11641:2012, дає результати, що відповідають результатам з природним потовиділення людей у більшості випадків. Стійкість забарвлення до сухого тертя вимірюють на приладі "Stainingtester" (фірма «Computex», Угорщина) згідно з ДСТУ ISO 105-X12:2016 [20].

Аналізуючи таблиці 3 та 4 можна зробити висновок, що при кольоровій відмінності 0,58-1,64 ($DE < 2$) інтенсивність фарбування бавовняних зразків тканини прямими барвниками із використанням очищеної стічної води знаходиться в межах 96-99% в порівнянні з еталоном (100%), стійкість досліджуваних зразків практично не відрізняється від показників стійкості пофарбованих бавовняних тканин з використанням пом'якшеної технологічної води.

Враховуючи сучасні тенденції рециркуляції води, як основного ресурсу фарбування тканини, під час проведення експерименту виникло завдання щодо додаткового дослідження можливості використання очищеної води в декількох технологічних циклах фарбування тканини. Кількість досліджуваних циклів очищення

Таблиця 5

Колірні характеристики пофарбованих тканин Бязь (артикул 3461) і Віскоза (артикул 3324) прямими барвниками з використанням води, очищеної адсорбційним методом після другого очищення

Барвник	Тканина	Світлість DL	Відтінок (червоно-зелений) Da	Відтінок (жовто-синій) Db	Кольорова відмінність DE*	Інтенсивність забарвлення, % відповідно до еталону (100%)
Прямий Синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	+0,36 світліший	-0,27 зеленіший	-0,48 синіший	0,86	96,4
	Віскоза (арт. 3324)	+0,78 світліший	+0,09 червоніший	+0,37 жовтіший	0,95	92,2
Прямий червоний світлостійкий	Бязь (арт. 3461)	+0,48 світліший	+0,36 червоніший	+0,83 жовтіший	1,51	95,2
	Віскоза (арт. 3324)	-1,83 темніший	+0,19 червоніший	+0,53 жовтіший	1,82	81,7
Прямий жовтий світлостійкий К	Бязь (арт. 3461)	-0,84 темніший	-1,01 зеленіший	-2,23 синіший	3,5	91,6
	Віскоза (арт. 3324)	+0,14 світліший	-1,65 зеленіший	+0,81 жовтіший	1,84	98,6

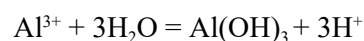
* Кольорова відмінність – математичне уявлення, що дає змогу чисельно виразити відмінність між двома кольорами в колориметрії. DE не має перевищувати 2, що приблизно відповідає мінімально помітній для людського ока відмінності між кольорами [18, с. 29-32].

одного й того ж об'єму води з подальшим фарбуванням запропоновано довести до трьох. Експериментально визначено колірні характеристики досліджених зразків. Результати наведені в таблицях 5 і 6.

Аналізуючи таблиці 5 і 6 спостерігається суттєве погіршення колірних характеристик пофарбованих тканин. Тож, можна зробити висновок, що один об'єм очищеної адсорбційним методом стічної води можна використати двічі лише для фарбування тканини Бязь (артикул 3461) барвниками Прямим синім Direct B2RL і Прямим червоним світлостійким та для фарбування тканини Віскоза (арт. 3324) барвником Прямим жовтим світлостійким К.

Погіршення нафарбовування тканини після двохкратного та крикратного очищення стічної води можна пояснити хімічним складом стічних вод та очищеної води, представленим в таблиці 1. Адсорбційне очищення стічної води, включаючи етапи коагуляції та флокуляції, не є досконалим щодо повного видалення іонів розчинних мінеральних солей. Після повторного очищення тієї самої стічної води відбувається накопичення іонів мінеральних солей (SO_4^{2-} , Cl^-) та солей Феруму, що може погіршувати адсорбційну здатність тканини (волокон) та закріплення барвника волокном. Поряд з цим, за рахунок використання

алюміній сульфату в якості коагулянту під час очищення, не всі іони Al^{3+} можуть бути осаджені, тому у водному розчині їх накопичення може призвести до утворення розбавленого колоїдного розчину з утворенням відповідного важкорозчинного гідроксиду $\text{Al}(\text{OH})_3$ за схемою:



Підвищення температури фарбувальної ванни, при якій відбувається фарбування за технологічним режимом (95°C), може сприяти утворенню розбавленого колоїдного розчину за рахунок утворення міцели складу $\left\{ \left[\text{Al}(\text{OH})_3 \right]_m n\text{AlO}^+ (n-x)\text{Cl}^- \right\} 3x\text{Cl}^-$. Перераховані фактори можуть бути основними причинами погіршення інтенсивності фарбування при кожному повторному процесі, починаючи з першого. Але перший цикл повторного використання (однократне очищення) стічної води дає ефективні результати щодо інтенсивності та стійкості забарвлень.

Висновки. Експериментальним шляхом досліджена можливість повторного використання очищеної адсорбційним методом стічної води фарбувального виробництва в процесі фарбування бавовняних тканин прямими барвниками. Вперше експериментально визначено, що

Колірні характеристики пофарбованих тканин Бязь (артикул 3461) і Віскоза (артикул 3324) прямими барвниками з використанням води, очищеної адсорбційним методом після третього очищення

Барвник	Тканина	Світлість DL	Відтінок (червоно-зелений) Da	Відтінок (жовто-синій) Db	Кольорова відмінність DE*	Інтенсивність забарвлення, % відповідно до еталону (100%)
Прямий Синій Direct B2RL	Бязь (арт. 3461)	+2,36 світліший	-1,27 зеленіший	-2,48 синіший	3,9	76,4
	Віскоза (арт. 3324)	+1,51 світліший	+1,09 черво-ніший	+1,37 жовтіший	4,8	84,9
Прямий червоний світло-стійкий	Бязь (арт. 3461)	+2,94 світліший	+1,47 черво-ніший	+1,85 жовтіший	3,6	70,6
	Віскоза (арт. 3324)	+2,51 світліший	+1,23 черво-ніший	+1,53 жовтіший	2,4	74,9
Прямий жовтий світло-стійкий К	Бязь (арт. 3461)	-3,33 темніший	-6,74 зеленіший	-3,01 зеленіший	5,3	66,7
	Віскоза (арт. 3324)	+0,73 світліший	-2,65 зеленіший	-2,87 зеленіший	3,8	92,7

* Кольорова відмінність – математичне уявлення, що дає змогу чисельно виразити відмінність між двома кольорами в колориметрії. DE не має перевищувати 2, що приблизно відповідає мінімально помітній для людського ока відмінності між кольорами [51, с. 29-32].

повторне використання очищеної стічної води в технології фарбування тканини Бязь (артикул 3461) забезпечує інтенсивність забарвлення тканини на рівні 95-98% у порівнянні з еталонном (100%), для тканини Віскоза (артикул 3324) інтенсивність забарвлення складає 96-99%. Стійкість одержаних забарвлень до сухого тертя, прання з використанням мила та дії «поту» на рівні 2-4 балів. Серією експериментів досліджено, що двократне очищення однієї і тієї ж стічної води дозволяє використовувати її для фарбування тканини Бязь (артикул 3461) барвниками Прямим синім Direct B2RL і Прямим червоним світлостійким та для фарбування тканини Віскоза (артикул 3324) барвником Прямим жовтим світлостій-

ким К (інтенсивність забарвлення пофарбованої тканини 95-98%, кольорова відмінність досліджених зразків має значення $DE < 2$ між еталонними та пофарбованими зразками, якісні показники досліджених зразків знаходяться в межах еталонних). Визначено, що стічна вода фарбувального виробництва, яка має негативний вплив на навколишнє середовище і забруднює його, може бути якісною вторинною сировиною для текстильної промисловості. Результати експериментальних досліджень, висвітлені в цій статті, будуть використані для створення ресурсозберігальної технології фарбування текстильних матеріалів із повторним використанням очищеної стічної води.

Список літератури:

1. Yaseen D.A., Scholz M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: A critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019. 16. Pp. 1193-1226.
2. Mohamed A. H., Ahmed E. Health and environmental impacts of dyes: Mini Review. *American Journal of Environmental Science and Engineering*. 2017. 1(3). Pp. 64-67. <https://doi.org/10.11648/j.ajese.20170103.11>
3. Lu X., Liu L., Liu R., Chen J. Textile wastewater reuse as an alternative water source for dyeing and finishing processes: A case study. *Desalination*. 2010. 258 (1-3). Pp. 229-232. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.002>.
4. Jimenez B., Asano T. Water Reuse: An International Survey of Current Practice. *Water Intell.* 2015.10 <https://www.semanticscholar.org/paper/Water-Reuse%3A-An-International-Survey-of-current-and-Jimenez-Asano/d979a6e91c613533528838c6960aec2755b68616> (дата звернення 10.01.2025)
5. Silva L.M., Moreira F.C., Souza A.U., Souza S., Boaventura R., Vilar V. Chemical and electrochemical advanced oxidation processes as a polishing step for textile wastewater treatment: A study regarding the discharge into the environment and the reuse in the textile industry. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 198. Pp. 430-442. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.001>

6. Holkar C.R., Jadhav A.J., Pinjari D.V., Mahamuni N.M., Pandit A.B. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management*. 2016. 182(1). Pp. 351-366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>
7. Reddy K.R., Kandou V., Havrelock R., El-Khattabi A.R., Cordova T., Wilson M.D., et al, editors. Reuse of Treated Wastewater: Drivers, Regulations, Technologies, Case Studies, and Greater Chicago Area Experiences. *Sustainability*. 2023. 15(9). Pp. 74-95. <https://doi.org/10.3390/su15097495>.
- 8 Chiong T., Lau S.Y., Lek Z.H., Koh B.Y., Danquah M.K. Enzymatic treatment of methyl orange dye in synthetic wastewater by plant-based peroxidase enzymes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016. 4 (2). Pp. 2500-2509. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.04.030>.
9. Mittersteiner M., Schmitz F., Barcellos I.O. Reuse of dye-colored water post-treated with industrial waste: Its adsorption kinetics and evaluation of method efficiency in cotton fabric dyeing. *Journal of Water Process Engineering*. 2017. 17. Pp. 181-187. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.04.004>.
10. Pinto C., Fernandes A., Nunes M. J., Baía A., Ciriaco L., Pacheco M.J. Reuse of Textile Dyeing Wastewater Treated by Electrooxidation. *Water*. 2022. 14 (7). Pp. 33-54. <https://doi.org/10.3390/w14071084>.
11. Firdous N. Shaikh I.A., Islam S., Arooj F. Multiple Reuse of Electrocoagulation Treated Reactive Dyeing Wash-Off: Colorimetric Properties and Water Saving. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2021. 8:9. Pp. 23-29. <https://doi.org/10.37421/2380-2391.2021.8.330>.
12. Chiarello L.M., Mittersteiner M., de Jesus P.C., Andreus J., Barcellos I.O. Reuse of enzymatically treated reactive dyeing baths: Evaluation of the number of reuse cycles. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 267. 122033. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122033>.
13. Hipólito Bezerra K.C., Fiaschitello T.R., Freeman H. S., Fragoso W.D., da Costa S.M., da Costa S.A. Reuse of water from real reactive monochromic and trichromic wastewater for new cotton dyes after efficient treatment using H₂O₂ catalyzed by UV light. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. 9 (4). 105731. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105731>.
14. Коваль М.Г. Дослідження очищення стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва адсорбційним методом з використанням природного цеоліту. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. 35 (74). 96-105. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/17>
15. Спосіб очищення мультикомпонентних стічних вод фарбувально-оздоблювального виробництва: пат. 151829 У країна: C02F 1/28 (2006.01) № у 2021 05931; заявл. 22.10.2021; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 38. 4с.
16. Olson ES. Textile Wet Processes. USA: Noyes Publications, Park Ridge. 1983.
17. Colorimetric Fundamentals CIELAB <https://surl.li/vdfxoc> (дата звернення 10.01.2025).
18. Gaurav S., Raja B. Digital Color Imaging Handbook. 2003.<https://surl.li/wqqfoj> (дата звернення 17.01.2025).
19. Державний стандарт України. Державний стандарт України. Матеріали та вироби текстильні, трикотажні, швейні та шкіряні. Терміни та визначення. 2001. (ДСТУ 3998-2000). Київ, Україна 2001. (<https://surl.li/zpmbvu> (дата звернення 12 січня 2025)).
20. International Standard. Textile materials. Determination of colour fastness. Part X12. Method for determining the friction resistance of colouring. (DSTU ISO 105-X12:2016) International Organization for Standardization. Technical Committee ISO/TC 38, Textiles. Geneva, Switzerland, 2016. <https://surl.li/hvtnor> (дата звернення 12 січня 2025).
21. International Standard. Textile materials. Determination of colour fastness. Part A02. Grey scale for assessing colour change. [homepage on the Internet]. (DSTU ISO 105 A02:2005) International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2005. <https://surl.li/pbxhhv> (дата звернення 12 січня 2025).
22. International Standard. Materials are textile. Test method for colour fastness. Part C10. Colour fastness to washing with soap or soap and soda [homepage on the Internet]. ((DSTU EN ISO 105-C10:2020 (EN ISO 105-C10:2007, IDT; ISO 105-C10:2006, IDT)) Geneva, Switzerland, 2007. <https://surl.li/vlurzo> (дата звернення 12 січня 2025)).

Koval M.G. STUDY OF COTTON FABRICS DYEING WITH DIRECT DYES WITH REUSE OF TREATED WASTEWATER

The textile industry consumes a large amount of water and produces a huge amount of wastewater, which has a negative impact on the overall ecosystem. It is important to develop cost-effective and environmentally friendly approaches to the proper treatment of industrial wastewater from dyeing production with their expedient reuse in textile production processes.

The article presents the results of experimental studies on the possibility of reusing wastewater from the dyeing industry (using a natural zeolite sorbent) treated by adsorption followed by coagulation and flocculation in the process of dyeing cotton fabrics with direct dyes of three primary colours: Direct blue Direct B2RL, Direct red lightfast, Direct yellow lightfast K. The process of fabric dyeing was carried out in the conditions of real dyeing and finishing production of Private Joint Stock Company Cherkasy Silk Plant (PJSC CSP) (Cherkasy, Ukraine). It was found that the reuse of treated wastewater in the technology of dyeing cotton fabric Calico (article 3461) provides a dye intensity of 95-98% compared to the standard (100%), for cotton fabric Viscose (article 3324) the dye intensity is 96-99%. The resistance of the obtained colours to dry friction, washing with soap and 'sweat' is 2-4 points. In order to determine the number of investigated cycles of purification of the same volume of water with subsequent dyeing, it was experimentally determined that double purification of the same wastewater allows its use for dyeing of calico fabric (article 3461) with Direct Blue Direct B2RL and Direct Red Lightfast dyes and for dyeing of viscose fabric (article 3324) with Direct Yellow Lightfast K dye (colour intensity of the dyed fabric is 95-98%, colour difference of the tested samples is $DE < 2$ between the reference and dyed samples, the quality indicators of the tested samples are within the reference ones).

The results of the experimental studies will serve to create a resource-saving technology for dyeing textile materials with the reuse of treated wastewater.

The methods of physical and chemical analysis, spectrophotometric method, methods of mathematical analysis and modern computing technology, MS Excel spreadsheet processor were used in the study and processing of experimental data.

Key words: *dyeing production, wastewater, wastewater treatment, adsorption, zeolite, direct dyes, calico, viscose.*

Майзеліс А.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

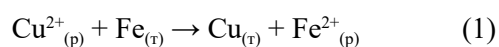
КОНТАКТНЕ ВИТІСНЕННЯ МІДІ В ПІРОФОСФАТНО-СУЛЬФОСАЛІЦИЛАТНОМУ ЕЛЕКТРОЛІТІ МІДНЕННЯ

Статтю присвячено аналізу процесу контактного витіснення міді поверхню деталей з вуглецевої сталі в пірофосфатно-сульфосалицилатних електролітах міднення. Параметри кінетики контактного обміну визначено з використанням координат точок експериментально отриманих поляризаційних залежностей спряжених реакцій, катодної реакції відновлення іонів міді, що суміщена с реакцією відновлення кисню, та анодної реакції розчинення сталі. Проведено моделювання та порівняння процесу гальванічного заміщення в пірофосфатному розчині та розведеному і концентрованому пірофосфатно-сульфосалицилатному розчині. Використано вдосконалену комп'ютерною обробкою даних метод визначення параметрів кінетики контактного обміну Антропова-Донченко, експериментальні методи лінійної вольтамперометрії, хронопотенціометрії, оптичної мікроскопії. Визначено, що в пірофосфатному розчині процес гальванічного заміщення стабілізується на рівні $0,9 \text{ мА/см}^2$ і супроводжується появою глибоких пір при формуванні компактного шару міді. В концентрованому пірофосфатно-сульфосалицилатному розчині густина струму контактного обміну досягає величини $1,65 \text{ мА/см}^2$ і за перші 4 хвилини осаджується шар міді товщиною $0,12 \text{ мкм}$, потім стаціонарний потенціал зміщується в бік позитивних значень і сталеву основу кородує з кисневою деполіаризацією в умовах пасивування поверхні. В розведеному пірофосфатно-сульфосалицилатному електроліті взаємодія сталі з розчином протікає, практично з початку, в діапазоні значень стаціонарного потенціалу, що відповідає спряженим процесам розчинення сталі зі швидкістю $0,11 \text{ мкм/год}$, в напівпасивному стані, і відновлення кисню. Тобто, при зануренні сталеві деталі в розведений пірофосфатно-сульфосалицилатний електроліт міднення контактне витіснення міді у цьому електроліті не здійснюється, але сталь кородує в ньому зі швидкістю $0,1 \text{ мА/см}^2$.

Ключові слова: гальванічне заміщення, міднення, пірофосфатно-сульфосалицилатний електроліт, моделювання контактного обміну, оптична мікроскопія, вольтамперометрія.

Постановка проблеми. Міднення є одним з найважливіших елементів гальванохімічного виробництва. Залежно від мети, з якою осаджують мідне покриття, використовують різні електроліти. Крім того, іони міді містяться і в електролітах для осадження покриттів сплавами міді з різними металами, а також в різних розчинах, наприклад, відпрацьованих мідьмістких розчинах, розчинах для переробки твердих відходів, що містять мідь, тощо.

Залежно від значень стаціонарного потенціалу сталі, а також від параметрів кінетики спряжених реакцій відновлення міді та окислення сталеві основи, на поверхні виробу, що покривається, можливе протікання реакції контактного обміну з витісненням іонів міді з електроліту шляхом їх відновлення на сталевій поверхні:



Ця реакція може бути використана для безструмового міднення. Однак у разі гальванічного процесу вона може бути причиною порушення

зчеплення покриття з основою. Швидкість цієї реакції, а також характер її продуктів, залежать від властивостей основи, що покривається, і використовуюваного електроліту. Для гальмування контактного обміну в електроліти вводять сполуки, що пасивують сталеву основу, зменшують концентрацію іонів міді в електроліті, зв'язують іони міді в комплексні сполуки. У тому числі використовують пірофосфатні електроліти, а також полілігандні, наприклад, пірофосфатно-сульфосалицилатний. Для покращення зчеплення запропоновано осаджувати підшар із розведеного електроліту міднення. Однак у літературі відсутні дані про кінетику контактного витіснення, які необхідні для оцінки наслідків знаходження деталей в електроліті без струму та вибору параметрів електролізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У промисловості покриття, які отримані в результаті контактного обміну, відомі як «імерсійні», в матеріалохімії цей процес називається «гальванічним заміщенням», в гідрометалургії він

широко використовується як «цементация» [1, 2]. Імерсійні покриття використовують при виготовленні друкованих плат, для металізації та наноструктурування поверхонь напівпровідників, нанесення покриттів на алюмінієві та магнієві сплави [3]. Металеві наноструктури, виготовлені за допомогою гальванічного заміщення, корисні для сенсорів, літій-іонних батарей, каталізаторів [4]. Двохступеневий процес електроосадження та редокс-заміщення нещодавно розроблено для відновлення металів з технологічних розчинів [5-6]. Гальванічне заміщення, що призводить до утворення надтонких шарів, відоме як «окисно-відновне заміщення з обмеженою поверхнею» 55-57 [7-9].

І якщо реакція заміщення є цільовим процесом, і якщо це небажаний процес, необхідно знати залежність її швидкості від часу. Кінетику реакцій обміну зазвичай визначають шляхом вимірювання швидкості зменшення концентрації іонів благородних металів у розчині методом титрування [1], спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою [10], спектроскопії зворотного розсіювання Резерфорда [3].

З використанням діаграм Еванса, які показують суперпозицію катодної та анодної спряжених поляризаційних кривих, незалежних одна від одної, для розрахунку параметрів кінетики контактного обміну запропоновано аналітичний метод Антропова-Донченко. Більшою мірою відображає складність реальних процесів методика розрахунку цих параметрів за координатами точок експериментально отриманих поляризаційних залежностей спряжених катодної та анодної реакцій [11-13].

Постановка завдання. Метою досліджень було порівняння параметрів кінетики контактного обміну в пірофосфатному і пірофосфатно-сульфосаліцилатному електролітах за допомогою методики їх розрахунку за координатами точок експериментально отриманих поляризаційних залежностей.

Виклад основного матеріалу. Методика. Всі розчини готували з реактивів марки «хч» і «чда» на дистильованій воді без додаткової обробки.

Склади електролітів, які були досліджені, наведено у табл. 1. Всі наведені розчини мали рН 8,5.

Виміри проводили в триелектродній комірці за допомогою потенціостату ПП-50.1. Робочими електродами служили зразки з міді та сталі Ст. 3. Площа поверхні робочих електродів становила 1 см². Поверхню зразків перед кожним виміром оновлювали за допомогою зачищення карбід-силіконовим папером №№ 500, 1000, 2000, 3000. Допоміжні мідний та скловуглецевий електроди у кілька разів перевершували за площею робочі електроди. Електрод порівняння – насичений хлоридсрібний. Значення потенціалів електродів наведені за цим електродом. Вольтамперограми отримали зі швидкістю розгортання потенціалу 50 мВ/с. Результати реєстрували в електронному вигляді з передачею даних на персональний комп'ютер зі швидкістю 2-100 сигналів в секунду.

Морфологію поверхні досліджено за допомогою оптичного мікроскопа БІОЛАМ М: об'єктив ЕП 9х0,2, окуляр 15х, освітлення у темному полі. Теоретична роздільна здатність даної конфігурації мікроскопа – 1,38 мкм.

Параметри кінетики контактного обміну в електролітах досліджували методом Донченко-Антропова, який був вдосконалений комп'ютерною обробкою даних [13]. Швидкість реакції контактного обміну, тобто густина струму контактного обміну j_0 , у відповідності до цього методу, в кожен момент часу визначали за рівнянням:

$$j_0 = j_k S_k = j_a S_a, \quad (2)$$

де j_k, j_a – густина струму катодної та анодної реакцій,

S_k, S_a – частка катодних та анодних ділянок поверхні, $S_k + S_a = 1$.

Частку поверхні, зайняту катодними ділянками при кожному значенні потенціалу, визначали за формулою:

Таблиця 1

Склад досліджених електролітів (Е – робочі електроліти, Ф – відповідні фонові розчини)

Електроліт		Вміст компонентів, моль/дм ³				
		[Cu ²⁺]	[P ₂ O ₇ ⁴⁻]	[SSaI ³⁻]	[Na ₂ SO ₄]	
Пірофосфатний розведений		Е-ПР	0,05	0,3	-	-
		Ф-ПР	-	0,3	-	0,05
Пірофосфатно-сульфо-саліцилатний	розведений	Е-ПСР	0,05	0,16	0,04	-
		Ф-ПСР	-	0,16	0,04	0,05
	концентрований	Е-ПСК	0,3	1	0,25	-
		Ф-ПСК	-	1	0,25	0,3

$$S_k = \frac{|j_a|}{|j_a| + |j_k|}. \quad (3)$$

Матрицю вихідних та розрахункових даних заповнювали за допомогою розробленої програми [13] для Wolfram Mathematica. Вона включала: час взаємодії, катодну і анодну густини струму, потенціал, частку катодних та анодних ділянок поверхні та густину струму контактного обміну.

Морфологію поверхні досліджено за допомогою оптичного мікроскопа БІОЛАМ М: об'єктив ЕПІ 9х0,2, окуляр 15х, освітлення у темному полі.

Результати досліджень. Вихідними даними для визначення основних параметрів кінетики контактного обміну в кожному електроліті були три залежності:

1) анодна поляризаційна залежність, одержана на електроді з матеріалу майбутньої деталі (у даному випадку це сталь Ст3) у фоновому електроліті (що не містить іонів міді іонів міді) зі швидкістю реєстрації даних 20 сигналів у секунду;

2) катодна поляризаційна залежність, одержана на міді у робочому електроліті зі швидкістю реєстрації даних 20 сигналів у секунду;

3) залежність стаціонарного потенціалу сталеві пластина від часу, одержана у робочому електроліті зі швидкістю реєстрації даних 100 сигналів у секунду (протягом 50-100 секунд з моменту

занурення) та 2 сигнали у секунду (у подальшому експерименті).

Порівняння спряжених поляризаційних залежностей, що отримані в розведених пірофосфатному і пірофосфатно-сульфосалицилатному електролітах показує, що у присутності сульфосалицилату підвищується поляризація як анодного процесу розчинення сталі у розчині фону (кр. 1 і кр. 3 рис. 1а, відповідно), так й катодного процесу осадження міді (кр. 1' і 3'). В більш концентрованому пірофосфатно-сульфосалицилатному електроліті (електроліт ЕПСК по табл. 1) і відповідному фоновому розчині (електроліт ФПСК) спостерігається пропорційне збільшення швидкості електродних процесів (кр. 2 і 2') в порівнянні з розведеним (кр. 3 і 3'). Однак швидкість анодного процесу в області активного розчинення сталі (кр. 3) нижча за швидкість у розведеному пірофосфатному розчині, а катодного процесу осадження міді – вища (кр. 3'). На рис. 1б ці спряжені поляризаційні залежності наведені у збільшеному масштабі у спільній області потенціалів, тобто в області потенціалів, в якій можливий процес контактний обмін.

Розраховані залежності швидкості контактний обміну в усій області потенціалів можливої взаємодії сталевих зразків з електролітами наведено на рис. 2. Швидкість контактний обміну у піро-

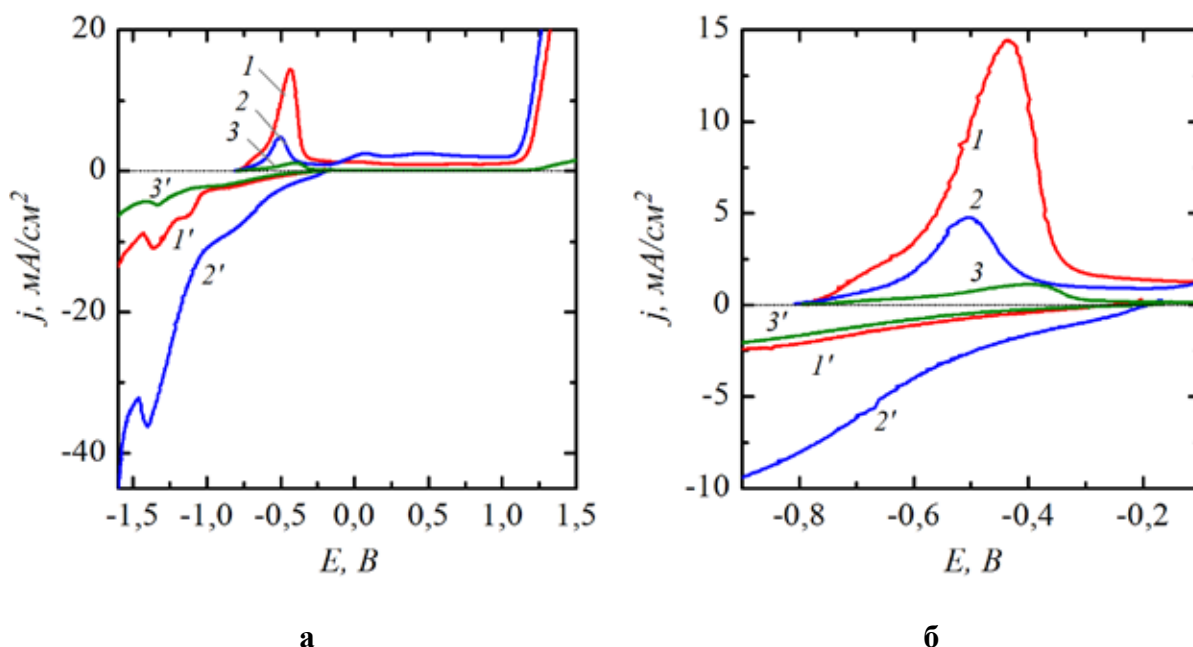


Рис. 1. Катодні поляризаційні залежності на міді (1'-3') і анодні поляризаційні залежності (1-3) на сталі в пірофосфатному розведеному (1 – ФПР, 1' – ЕПР), пірофосфатно-сульфосалицилатному концентрованому (2 – ФПСК, 2' – ЕПСК) і пірофосфатно-сульфосалицилатному розведеному (3 – ФПСР, 3' – ЕПСР) електролітах (див. табл. 1) в широкому діапазоні потенціалів (а) та в діапазоні потенціалів взаємодії електроліта зі сталлю (б)

фосфатно-сульфосаліцилатному розчині зменшується при розведенні (кр. 1 і 3 рис. 2а). Вона стає значно менша в порівнянні й зі швидкістю контактного обміну в пірофосфатному електроліті (кр. 2).

Монотонність залежностей від потенціалу частки поверхні, зайнятої катодними ділянками при зануренні сталеві пластина в розчині, що містять пірофосфатні та сульфосаліцилатні комплекси міді (рис. 2б), порушується поблизу області потенціалів початку пасивації сталеві поверхні.

Поверхня зануреного в пірофосфатний електроліт сталеві зразка протягом 20 секунд активується (рис. 3а, кр. 3) і починається процес осадження міді, а у присутності сульфосаліцилату (кр. 1) потенціал зразка залишається в області потенціалів, відповідної корозійного процесу з кисневою деполаризацією. У концентрованому розчині (кр. 2) осадження міді починається через 3 с, але після 2 хвилин сталь в порах починає активуватися (кр. 2 рис. 3б) та її розчинення через 5 хвилин стає вже наслідком корозійного процесу. Як свідчать залежності рис. 3б, реальний процес контактного обміну протікає у широкому діапазоні потенціалів лише у пірофосфатному електроліті (кр. 3 рис. 3б).

Зростаючи в перші секунди до $1,6 \text{ mA/cm}^2$ швидкість контактного обміну у концентрованому пірофосфатно-саліцилатному розчині (кр. 1

рис. 4а) через 6 хвилин знижується до значень, що відповідають швидкості взаємодії сталі з неаерованим розведеним розчином (рис. 4б, кр. 3). У пірофосфатному електроліті швидкість контактного обміну протягом 18 секунд збільшується (рис. 4а, кр. 2) і потім залишається постійною (рис. 4б, кр. 2), на рівні $0,9 \text{ mA/cm}^2$.

Сталеві зразки, морфологію поверхні яких наведено на рис. 6а, занурені у розведений пірофосфатно-сульфосаліцилатний електроліт, вже спочатку мають лише 10 % поверхні, що покрита катодними ділянками (рис. 5а, кр. 3), на яких відновлюється кисень. Остання поверхня сталі розчиняється, хоча й з досить низькою швидкістю.

В концентрованому пірофосфатно-саліцилатному електроліті після осадження тонкого шару компактної міді (рис. 6в), площа катодних ділянок зменшується (рис. 6г), починається корозійне розчинення сталі, яке здійснюється на меншій площі сталеві поверхні (рис. 5б, кр. 2) в напівпасивному стані (рис. 6д). Частка поверхні, що покривається компактною міддю, стабілізується у пірофосфатному електроліті на величині 65 % (рис. 5б, кр. 1). Анодна складова процесу обміну, активне розчинення сталі, локалізується, на меншій площі поверхні з формуванням глибоких пір (рис. 6б).

Висновки. На підставі визначення параметрів кінетики контактного обміну змодельований про-

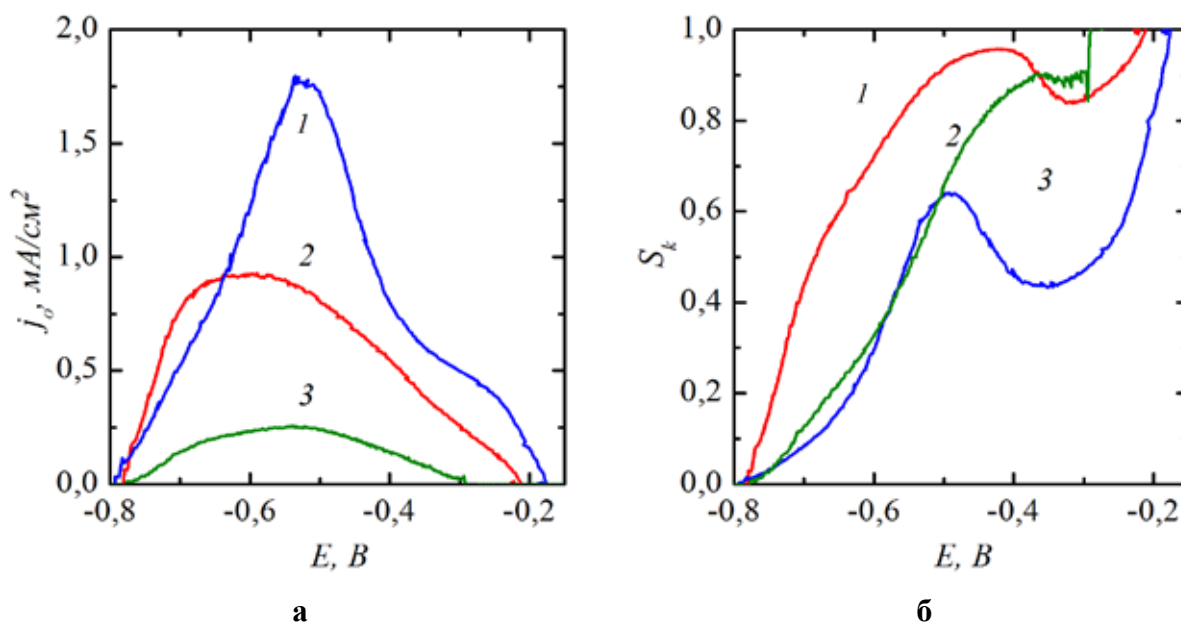


Рис. 2. Густина струму контактного обміну j_0 (а) і частка площі поверхні S_k , що зайнята міддю (б), в залежності від потенціалу сталеві електрода E в пірофосфатно-сульфосаліцилатному концентрованому (1а, 3б), пірофосфатному (2а, 1б) і пірофосфатно-сульфосаліцилатному розведеному (3а, 2б) електролітах

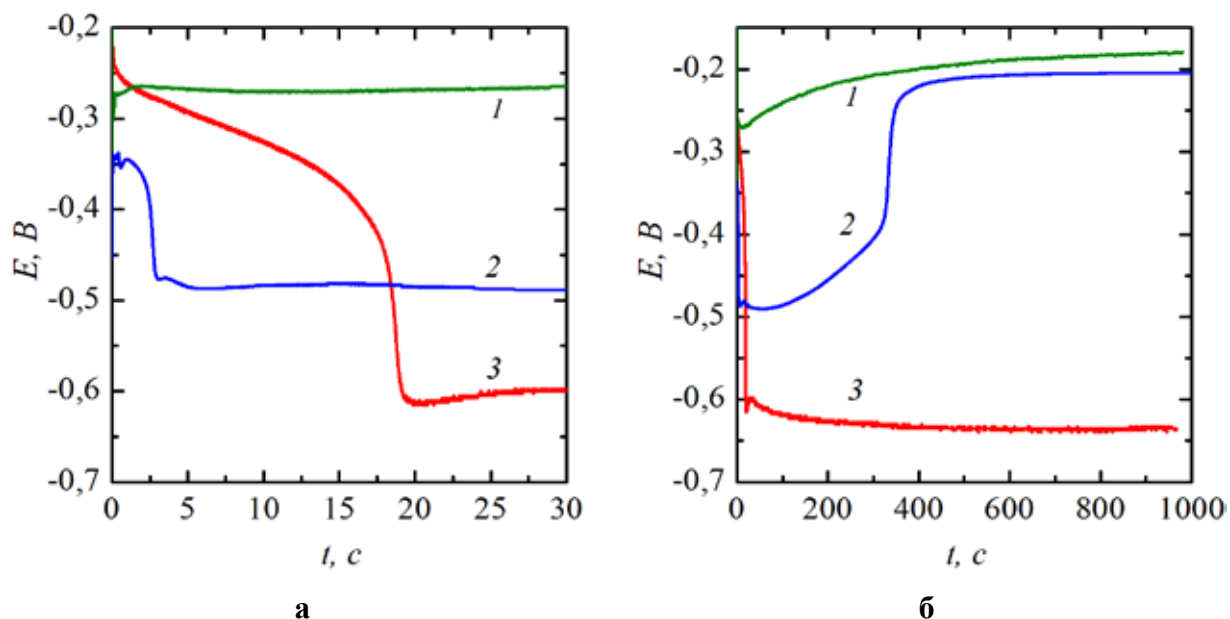


Рис. 3. Зміна в часі потенціалу E сталевих зразків в пірофосфатно-сульфосаліцилатному розведеному (1), пірофосфатно-сульфосаліцилатному концентрованому (2) і пірофосфатному (3) електролітах

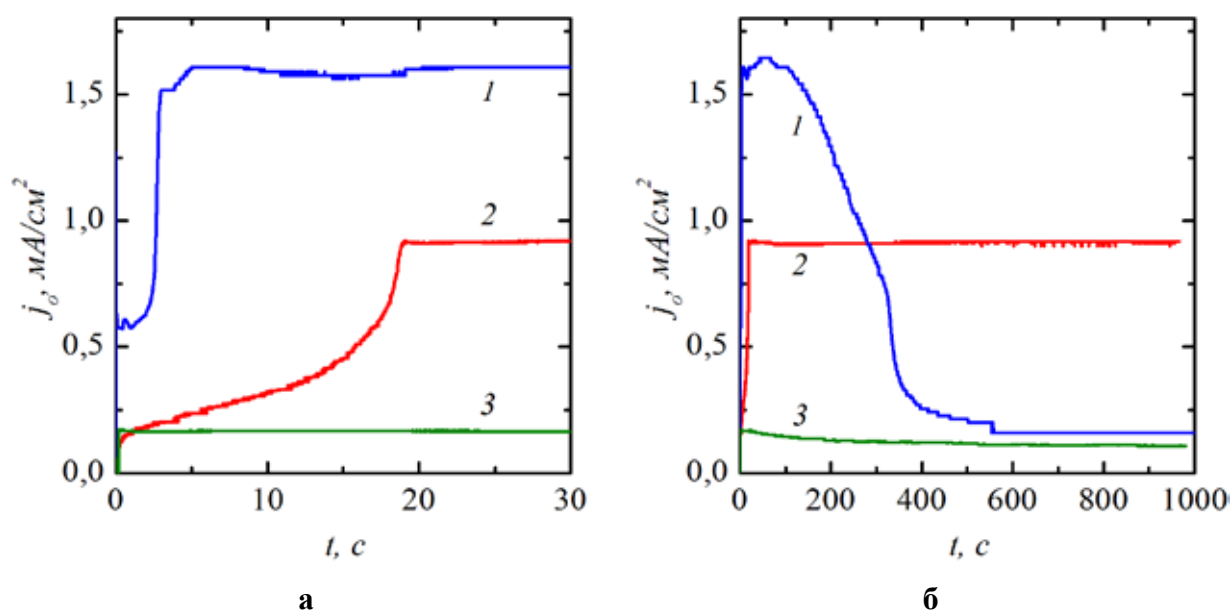


Рис. 4. Зміна в часі густини струму контактного обміну j_0 в пірофосфатно-сульфосаліцилатному концентрованому (1), пірофосфатному (2) і пірофосфатно-сульфосаліцилатному розведеному (3) електролітах

цес контактного витіснення міді сталевими деталями з пірофосфатно-сульфосаліцилатних електролітів.

Показано, що в пірофосфатному електроліті в результаті контактного обміну осаджується компактний шар міді, який не порушує зчеплення майбутнього покриття з основою, але анодна складова контактного обміну, активне розчинення

сталі у даному випадку, призведе до формування глибоких пір.

В концентрованому пірофосфатно-сульфосаліцилатному розчині шар міді товщиною 0,12 мкм осаджується вже за перші 4 хвилини, потім сталеву основу кородує з пасивуванням поверхні. Тому, щоб уникнути погіршення зчеплення мідного покриття зі сталеву основу, доцільно

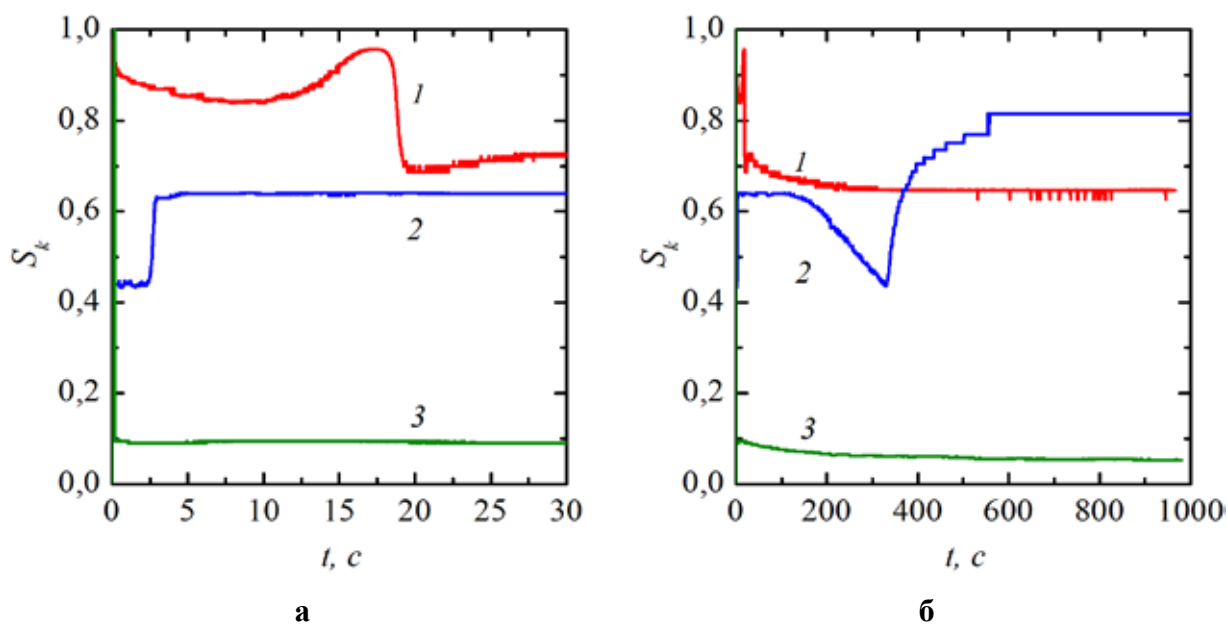


Рис. 5. Зміна в часі частки площі сталеві поверхні, що зайнята міддю, S_k , в пірофосфатному (1), пірофосфатно-сульфосалицилатному концентрованому (2) і пірофосфатно-сульфосалицилатному розведеному (3) електролітах

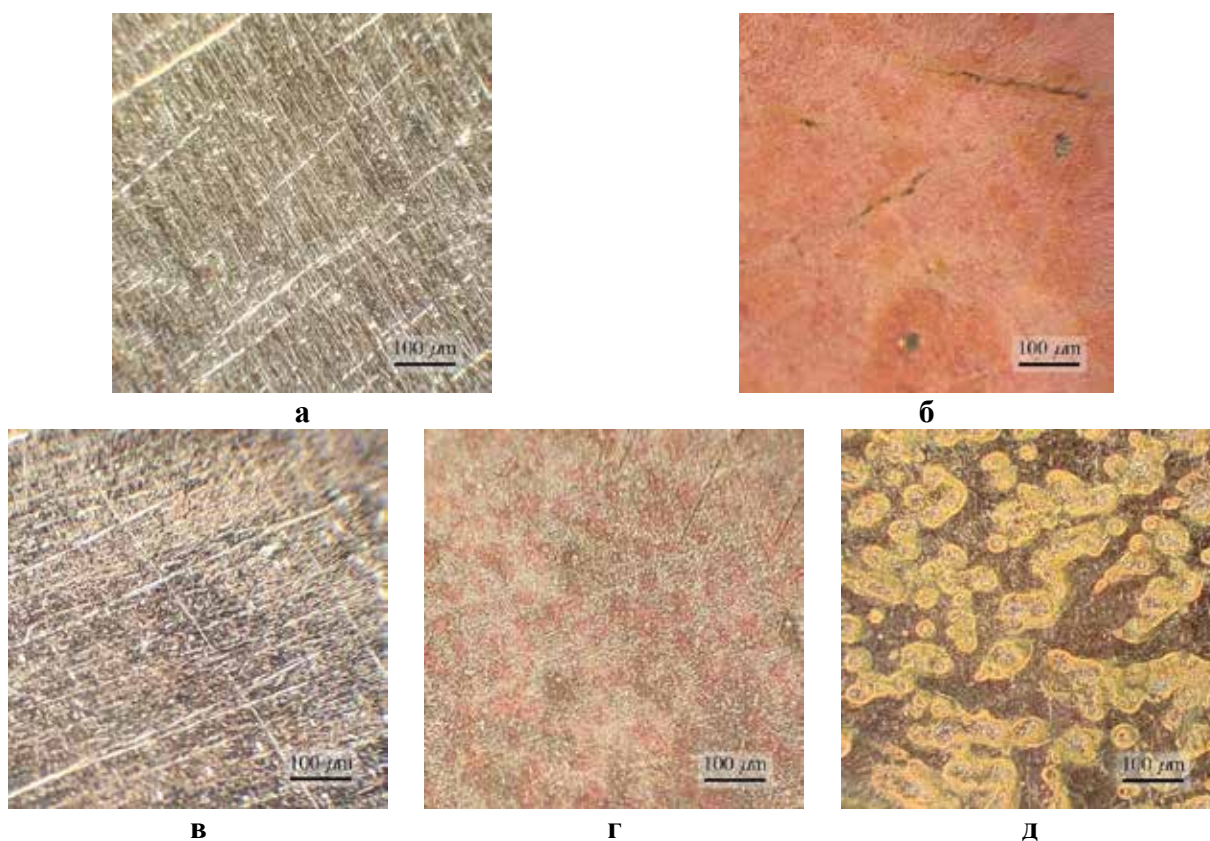


Рис. 6. Морфологія поверхні сталевго зразка без обробки (а) і після занурення в пірофосфатний електроліт (б) і пірофосфатно-сульфосалицилатній (в-д) протягом 100 с (в), 300 с (г) і 1000 с (б, д)

використовувати операцію нанесення підшару з розведеного електроліту.

В розведеному пірофосфатно-сульфосаліцилатному електроліті швидкість контактної взаємодії складає $0,1 \text{ мА/см}^2$. Враховуючі значення стаціонарного потенціалу сталевго електроду в цьому розчині, що дорівнює $-0,2 \text{ В}$, на катодних ділянках протікає, в основному, реакція відновлення кисню. Тому, при зануренні сталевго деталі

в розведений пірофосфатно-сульфосаліцилатний електроліт міднення спостерігається не контактне витиснення міді, а лише розчинення, зі швидкістю $0,11 \text{ мкм/год}$, сталі з кисневої деполяризацією. Завдяки зв'язуванню іонів заліза в міцні комплекси на поверхні деталі при розчиненні не утворюються нерозчинні осади, які б чинили перешкоди зчепленню мідного покриття, що в подальшому буде осаджуватися, зі сталевго основою.

Список літератури:

1. Ekmekyapar A., Tanaydin M., Demirkiran N. Investigation of copper cementation kinetics by rotating aluminum disc from leach solutions containing copper ions. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2012. Vol. 48. P. 355–367.
2. Cui L., Yliniemi K., Vapaavuori J., Lundström M. Recent developments of electrodeposition-redox replacement in metal recovery and functional materials: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 465. P. 142737.
3. Pachchigar V., Varshney J., Ghosh S.K., Kain V. Reinvestigation of nucleation and growth of Zn on Al surface during modified alloy zincating. *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 382. P. 125191.
4. Castagna R.M., Sieben J.M., Alvarez A.E., Sanchez M.D., Duarte M.M. Carbon supported PtNiCu nanostructured particles for the electro-oxidation of ethanol in acid environment. *Materials Today Energy*. 2020. Vol. 15. P. 100366.
5. Korolev I., Altinkaya P., Haapalainen M., Kolehmainen E., Yliniemi K., Lundström M. Electrohydrometallurgical chloride process for selective gold recovery from refractory telluride gold ores: A mini-pilot study. *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 429. P. 132283.
6. Rinne M., Halli P., Aromaa J., Lundström M. Alternative method for treating electric arc furnace dust: simulation and life cycle assessment. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022. Vol. 8(2). P. 913–926.
7. Wang Z., Yliniemi K., Rautama E.-L., Hannula P.-M., Wilson B.P., Lundström M. Electrochemical Growth of Ag/Zn Alloys from Zinc Process Solutions and Their Dealloying Behavior, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2022. Vol. 10. P. 3716–3725.
8. Wang Z., Yliniemi K., Wilson B.P., Lundström M. Green and Controllable Preparation of Cu/Zn Alloys Using Combined Electrodeposition and Redox Replacement, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2022. Vol. 10. P. 4770–4779.
9. Wang Z., Yliniemi K., Wilson B.P., Lundström M. Targeted surface modification of Cu/Zn/Ag coatings and Ag/Cu particles based on sacrificial element selection by electrodeposition and redox replacement. *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 441. P. 128531.
10. Panzeri G., Dell'Oro R., Trifiletti V., Parravicini J., Acciarri M., Binetti S., Magagnin L. Copper electrodeposition onto zinc for the synthesis of kesterite $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ from a Mo/Zn/Cu/Sn precursor stack. *Electrochemistry Communications*. 2019. Vol. 109. P. 106580.
11. Maizelis A. Contact exchange in tetrafluoroborate-EDTA electrolyte for Cu-Sn alloy deposition. *Materials today: proceedings*. 2019. Vol. 6. P. 135–140.
12. Maizelis A.A., Bairachnyi B.I., Tul'skii G.G. Contact displacement of copper at copper plating of carbon steel parts. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 54(1). P. 12–19.
13. Майзеліс А.О. Кінетика контактного обміну металів: монографія. Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2021. 180 с.

Maizelis A.O. CONTACT DISPLACEMENT OF COPPER IN PYROPHOSPHATE-SULFOSALICYLATE ELECTROLYTE FOR COPPER PLATING

The article is devoted to the analysis of the process of contact displacement of copper by the surface of carbon steel parts in pyrophosphate-sulfosalicylate copper plating electrolytes. The parameters of the contact exchange kinetics were determined using the coordinates of the points of the experimentally obtained polarization curves of the conjugate reactions, the cathodic reaction of copper ion reduction, which is combined with the oxygen reduction reaction, and the anodic reaction of steel dissolution. The processes of galvanic replacement in pyrophosphate solution and diluted and concentrated pyrophosphate-sulfosalicylate solution were modeled and compared. The Antropov-Donchenko method of determining the parameters of the contact exchange kinetics, improved by computer data processing, was used, as well as experimental

methods of linear voltammetry, chronopotentiometry, and optical microscopy. It was determined that in the pyrophosphate solution the galvanic replacement process stabilizes at 0.9 mA/cm² and is accompanied by the appearance of deep pores during the formation of a compact copper layer. In the concentrated pyrophosphate-sulfosalicylate solution the contact exchange current density reaches 1.65 mA/cm² and in the first 4 minutes a copper layer 0.12 μm thick is deposited, then the stationary potential shifts towards positive values and the steel corrodes with oxygen depolarization under conditions of surface passivation. In the diluted pyrophosphate-sulfosalicylate electrolyte the interaction of steel with the solution proceeds, almost from the beginning, in the range of values of the stationary potential, which corresponds to the conjugate processes of steel dissolution at a rate of 0.11 μm/h, in a semi-passive state, and oxygen reduction. That is, when immersing a steel part in a diluted pyrophosphate-sulfosalicylate copper plating electrolyte, contact displacement of copper in this electrolyte does not occur, but the steel corrodes in it at a rate of 0.1 mA/cm².

Key words: galvanic replacement, copper plating, pyrophosphate-sulfosalicylate electrolyte, contact exchange modeling, optical microscopy, voltammetry.

УДК 67.06 : 666.9.022.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/28>**Мельник Л.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Свідерський В.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Доній О.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Стаття містить результати дослідження теплопровідності полімерних композитів та оптимізацію їх складів із використанням бінарних систем мінеральних наповнювачів (відсівів андезиту, перліту і цеоліту) з метою підвищення теплоізоляційних властивостей.

У роботі проведено розрахунки розмірів кристалітів наповнювачів із застосуванням рівняння Шеррера. Встановлено, що мікро- та наноструктурні характеристики наповнювачів відіграють ключову роль у визначенні теплопровідності композитів. Досліджено залежність теплопровідності від концентрації наповнювачів у широкому діапазоні (65-90 мас.%) та від температури в межах від -100 до +100 °С. Аналіз показав, що підвищення концентрації мінеральних наповнювачів до 90 мас.% суттєво знижує теплопровідність композитів, а температурний фактор має мінімальний вплив на системи з високим вмістом наповнювачів.

Для моделювання теплопровідності використано кілька теоретичних моделей, включаючи послідовну, паралельну, Хашина-Штрікмана та Нільсена. Зокрема, модель Нільсена виявилася найбільш ефективною для систем із високими концентраціями наповнювачів, оскільки вона враховує міжфазні взаємодії, ефекти упаковки частинок та їх орієнтацію. Результати моделювання підтвердили, що система перліт (27 мас.%) + андезит (48 мас.%) має найнижчу теплопровідність серед досліджених бінарних систем – 0,182 Вт/м·К. Інші комбінації, такі як цеоліт (27 мас.%) + андезит (48 мас.%), також продемонстрували низьку теплопровідність (0,184 Вт/м·К), що підтверджує доцільність використання андезиту як основного компонента.

Комбінації цеоліт + перліт, незалежно від їх співвідношення, показали найвищі значення теплопровідності серед досліджених бінарних систем (0,212 Вт/м·К). Це обумовлено близькими значеннями теплопровідностей цих наповнювачів і відсутністю значного синергетичного ефекту.

Розрахунки, на відміну від експериментальних даних, показали, що тип полімерної матриці має обмежений вплив на теплопровідність композитів при високих концентраціях наповнювачів. Заміна зв'язуючого Latex 2012 на Policril 590 не призвела до значного зростання теплопровідності, що робить обидва зв'язуючі прийнятними для використання в теплоізоляційних матеріалах.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили ефективність використання вторинних мінеральних ресурсів для створення полімерних композитів із високими теплоізоляційними властивостями. Оптимізація складів бінарних наповнювачів дозволила визначити співвідношення компонентів, які забезпечують мінімальну теплопровідність.

Ключові слова: композит, наповнювач, андезит, латекс, цеоліт, перліт, теплопровідність, модель Нільсена.

Постановка проблеми. Ефективне управління експлуатаційними характеристиками матеріалів є одним із актуальних завдань сучасного матеріалознавства. У зв'язку з глобальними викликами, такими як підвищення енергоефективності, екологічна безпека та раціональне

використання природних ресурсів, розробка полімерних композитів із покращеними теплофізичними властивостями набуває особливого значення. Використання відсівів андезиту, перліту та цеоліту, які є відходами гірничого видобутку, як наповнювачів для полімерних композитів, відкри-

ває нові можливості для створення матеріалів із заданими характеристиками. Такий підхід сприяє не лише зменшенню обсягів накопичення промислових відходів, але й дозволяє підвищити екологічну ефективність виробництва. Водночас недостатність узагальнених даних щодо впливу типу, концентрації та температури на теплопровідність полімерних композитів із такими наповнювачами, а також їх взаємодії з полімерною матрицею, створює труднощі у виборі оптимальних компонентів і параметрів для створення матеріалів із покращеними характеристиками. Отже, дослідження впливу відходів видобутку вулканічних порід на теплопровідність полімерних композитів є актуальним завданням для вирішення питань, пов'язаних із підвищенням ефективності теплоізоляційних систем, розвитком екологічно чистих технологій і раціональним використанням вторинних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження демонструють значний інтерес до використання мінеральних наповнювачів у полімерних композитах завдяки їхній здатності покращувати фізико-хімічні властивості матеріалів. У роботі [1] досліджено ефективність часткової заміни цементу на андезитовий пил у цементних композитах. Було встановлено, що при заміні до 15 % цементу спостерігається покращення міцності композитів та зниження водопоглинання за рахунок ущільнення порової структури. Більший відсоток заміщення цементу забезпечує підвищену еластичність матеріалів завдяки утворенню гнучкіших структурних зв'язків.

У роботі [2] відзначили потенціал андезитових відсівів як заміни традиційного шамоту у виробництві пористої кераміки. Використання андезиту забезпечує зниження енерговитрат під час випалу, підвищує термостійкість і міцність готових виробів, а також дозволяє створювати пористі матеріали для застосування у фільтраційних системах.

Дослідження [3] показало, що геополімерні розчини, виготовлені з відходів андезитового пилу, можуть бути використані як екологічно чиста альтернатива портландцементу. Встановлено, що активація цього пилу із використанням силікату натрію дозволяє створювати матеріали з високою міцністю при стисненні, хоча водяне охолодження негативно впливає на їхню мікроструктуру, сприяючи утворенню мікротріщин.

Розробки, присвячені використанню перліту та цеоліту в полімерних композитах, свідчать про їх перспективність. Перліт, завдяки своїй низькій

густині та високим теплоізоляційним властивостям, часто використовується як наповнювач у будівельних матеріалах. Його застосування дозволяє знижувати вагу та покращувати термостійкість матеріалів, що підтверджено у дослідженнях [4].

Цеоліт, завдяки своїй каркасній структурі та розвинутій пористості, використовується для створення композитів із покращеними механічними та сорбційними властивостями. В роботі [5] відмічено, що цеоліт забезпечує підвищення міцності композитів і може слугувати платформою для розробки функціональних матеріалів із додатковими властивостями.

Таким чином, аналіз останніх публікацій підтверджує перспективність використання мінеральних наповнювачів, зокрема перліту, цеоліту та андезиту, у композитах для підвищення їх функціональних характеристик. Однак залишається відкритим питання щодо взаємодії цих наповнювачів із різними полімерними матрицями, та їх вплив на теплофізичні властивості отриманих композитів, що потребує подальших досліджень. Крім того питання оптимізації концентрацій наповнювачів для покращення теплопровідності залишаються актуальними.

Постановка завдання. Видобуток вулканічних порід супроводжується утворенням значної кількості відсівів, які становлять 10-30 % від обсягу видобутої породи. Це призводить до накопичення відходів на місцях видобутку, що займають великі площі та створюють екологічні ризики, зокрема негативний вплив на навколишнє середовище. Розробка ефективних методів утилізації таких відходів є актуальним завданням у контексті збереження екосистем.

Водночас наповнювачі вулканічного походження мають значні фізико-механічні та теплофізичні властивості, які роблять їх перспективними для використання в полімерних композитах. Зокрема, андезит забезпечує підвищення міцності, жорсткості, термічної та хімічної стійкості, а також характеризується низькою теплопровідністю, що може використовуватися для створення теплоізоляційних матеріалів. Цеоліт, завдяки своїм унікальним адсорбційним властивостям, сприяє покращенню функціональних характеристик композитів.

Тому метою даної роботи є аналіз теплопровідності полімерних композитів із наповнювачами у вигляді відсівів андезиту, перліту та цеоліту, а також моделювання процесів теплопередачі в цих матеріалах. Дослідження спрямоване на вивчення впливу концентрації наповню-

вачів та температури, їх хімічних і структурних характеристик на теплопровідність композитів та розробку моделі, яка дозволить прогнозувати теплопровідність залежно від складу і умов експлуатації.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженні для створення композитів застосовували полімерну матрицю на основі водних дисперсій марки Latex 2012, яка є сополімером стиролу та бутадієну та характеризується вмістом сухого залишку 51,0 мас.%, середнім розміром частинок 140 нм та в'язкістю 200 мПа·с. Також використовували водну дисперсію марки Policril 590, яка є акриловим полімером із вмістом сухого залишку 53,5-55,0 мас.% та середнім розміром частинок 200 нм та в'язкістю <1000 мПа·с.

Як мінеральні наповнювачі використовували андезит Хустського, перліт Берегівського та цеоліт Сокиринського родовища, розташованих у Закарпатській області, Україна. Ці матеріали є відходами гірничодобувної промисловості та мають значний потенціал для застосування у складі полімерних композитів завдяки своїм фізико-хімічним властивостям.

Виходячи з попередніх наших досліджень [6] дані вулканічні породи мають суттєві відмінності у хіміко-мінералогічному складі. Хімічний аналіз проб виявив, що за співвідношенням основних структуроутворюючих оксидів вони утворюють такий ряд перліт > цеоліт > андезит (табл. 1), що по певним співвідношенням у числовому еквіваленті відповідно відповідає :

за вмістом $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 5,58 > 5,22 > 3,52$;

за вмістом $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3 - 48,05 > 45,43 > 7,09$;

за вмістом $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) - 5,0 > 4,55 > 2,35$.

Мінералогічний склад досліджуваних порід має свої особливості [6]: так перліт характеризується домінуванням склофази з незначними включеннями кристалічних фаз, зокрема кварцу та польових шпатів. У цеоліті, порівняно з перлітом, спостерігається менша кількість склофази, тоді як кристалічні фази представлені кліноптилолітом, кварцом і польовими шпатами. Андезит вирізняється значним розвитком кристалічних фаз, таких

як андезин, авгіт, біотит, рогова обманка та магнетит.

Зразки для досліджень являли собою таблетки з діаметром 15 мм і висотою 3-4 мм. Технологія їх виготовлення описана в нашій попередній роботі [7].

Вимірювання теплопровідності здійснювали за допомогою аналізатора теплопровідності ІТ-λ-400, що працює за методом динамічної калориметрії та охоплює температурний діапазон від 148 К до 373 К. Для забезпечення належного теплового контакту поверхні зразків були відполіровані до шорсткості $R_z < 0,63$ мкм. На контактні площини наносили теплопровідне мастило, яке мінімізувало тепловий опір.

Під час експерименту зразки піддавали впливу стаціонарного теплового потоку, а температурний градієнт реєстрували за допомогою хромель-алюмінієвих термопар. Теплопровідність (λ) розраховували за формулою:

$$\lambda = h/P$$

де λ – теплопровідність (Вт/м·К), h – висота зразка (м), P – тепловий опір зразка ($\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$).

Середню температуру визначали як середнє арифметичне значення температури на верхній і нижній поверхнях зразка. Метод забезпечує точність із похибкою не більше $\pm 10\%$, що дозволяє отримувати достовірні дані для оцінки теплопровідності композитів у широкому температурному діапазоні.

На основі даних дифрактограм, отриманих у попередніх дослідженнях [6], було розраховано розмір кристалітів наповнювачів за допомогою рівняння Шеррера [8], що дозволило оцінити їхні нанорозмірні характеристики:

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta}$$

де: D – розмір кристаліту (нм), $K=0,9$ – фактор форми, $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$ – довжина хвилі рентгєнівського випромінювання, β – FWHM (повна ширина на половині максимуму) у радіанах, θ – кут Бреґґа.

Застосування цієї методології дозволило створити основу для аналізу впливу нанорозмірних

Таблиця 1

Хімічний склад наповнювачів

Назва проби	Вміст оксидів, мас. %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	в.п.п.
перліт	72,08	12,92	1,50	0,90	0,88	0,63	3,76	4,33	3,00
цеоліт	68,02	13,04	1,92	0,30	2,71	1,63	1,57	2,64	16,94
андезит	59,70	16,97	8,42	0,72	5,76	1,21	2,68	1,82	1,11

властивостей дослідних вулканічних наповнювачів на теплопровідність полімерних композитів. Це забезпечує можливість дослідити їхній синергетичний вплив на теплофізичні властивості матеріалів і оптимізувати їхній склад для підвищення ефективності.

Виклад основного матеріалу. Структурні характеристики наповнювачів відіграють вирішальну роль у формуванні теплопровідності полімерних композитів. Одним із ключових параметрів, що впливають на теплові властивості матеріалів, є розмір кристалітів, який визначає середній розмір когерентно дифрагуючих областей у структурі матеріалу. Особливо це важливо для мікро- та наноструктурованих матеріалів, де розмір кристалітів значно впливає на міжфазні взаємодії та механізми розсіювання фонів, що визначають теплову поведінку композитів.

Для визначення розміру кристалітів за рівняння Шеррера проводили розрахунки для двох дифракційних піків кожного наповнювача, а результати наведені у таблиці 2. Для забезпечення більшої репрезентативності було визначено середній розмір кристалітів, який дозволяє об'єктивно порівнювати структурні властивості наповнювачів та їхній вплив на теплопровідність полімерних композитів.

Мінералогічний склад досліджуваних порід суттєво впливає на їхні теплофізичні властивості (табл. 2). Перліт характеризується найбільшим середнім розміром кристалітів, який становить 232,9 нм. Це узгоджується з його мінералогічним складом, де домінує склофаза. Це домінування сприяє впливає на теплопровідність перліту, яка становить 0,267 Вт/м·К і є середнім значенням серед досліджуваних матеріалів.

Цеоліт має менший середній розмір кристалітів, що дорівнює 128,3 нм, в його мінералогічному складі переважають кристалічні фази з незначним вмістом склофаз. Високий вміст кристалічних фаз забезпечує цеоліту найвищу теплопровідність серед досліджуваних матеріалів, яка складає 0,272 Вт/м·К.

Андезит вирізняється найменшим середнім розміром кристалітів – 110,0 нм. Це зумовлено складним мінералогічним складом, у якому домінують численні кристалічні фази. Велика кількість меж між кристалічними фазами сприяє додатковому тепловому опору, що обумовлює найнижчу теплопровідність андезиту серед досліджуваних матеріалів – 0,212 Вт/м·К.

Аналіз теплопровідності композитів із використанням цих наповнювачів демонструє, що зі збільшенням концентрації наповнювачів із 65 до 90 мас.% теплопровідність суттєво зростає для всіх матеріалів (рис. 1). Найбільший приріст теплопровідності спостерігається для композитів з андезитом, що пояснюється високою щільністю цього матеріалу. Перліт і цеоліт також демонструють зростання теплопровідності з підвищенням концентрації, однак їхні абсолютні значення залишаються нижчими, ймовірно, через більшу частку склофази у їхньому складі.

Температура також відіграє ключову роль у формуванні теплопровідності композитів. Зі збільшенням температури до 373 К теплопровідність композитів з андезитом і перлітом стабільно зростає, що свідчить про посилення механізмів теплопередачі через теплопровідні наповнювачі. У випадку цеоліту вплив температури менш виражений, що може бути пов'язано із присутністю адсорбованої вологи, яка частково обмежує ефективність теплопередачі.

Полімерна матриця також суттєво впливає на теплопровідність композитів. У випадку аморфних полімерів, таких як стирол-бутадієновий Latex 2012 і акриловий Policril 590, теплопровідність залежить від механізмів теплопередачі, що включають передачу тепла між молекулами через коливальні рухи. При підвищенні температури теплопровідність аморфних полімерів зростає через збільшення інтенсивності молекулярних флуктуацій.

Тому важливим залишається експериментальне визначення теплопровідності дослідних

Таблиця 2

Розрахунок розміру кристалітів на основі даних дифрактограм

Матеріал	$2\theta, ^\circ$	FWHM, β , рад	Розмір кристаліту, D, нм	Середній розмір кристаліту (нм)	Теплопровідність, Вт/м·К
Перліт	27,2	0,8	240,8	232,9	0,267
	29,5	0,9	224,9		
Цеоліт	24,8	0,7	137,2	128,3	0,272
	29,3	0,8	119,4		
Андезит	26,5	0,7	116,6	110,0	0,212
	32,0	0,8	103,3		

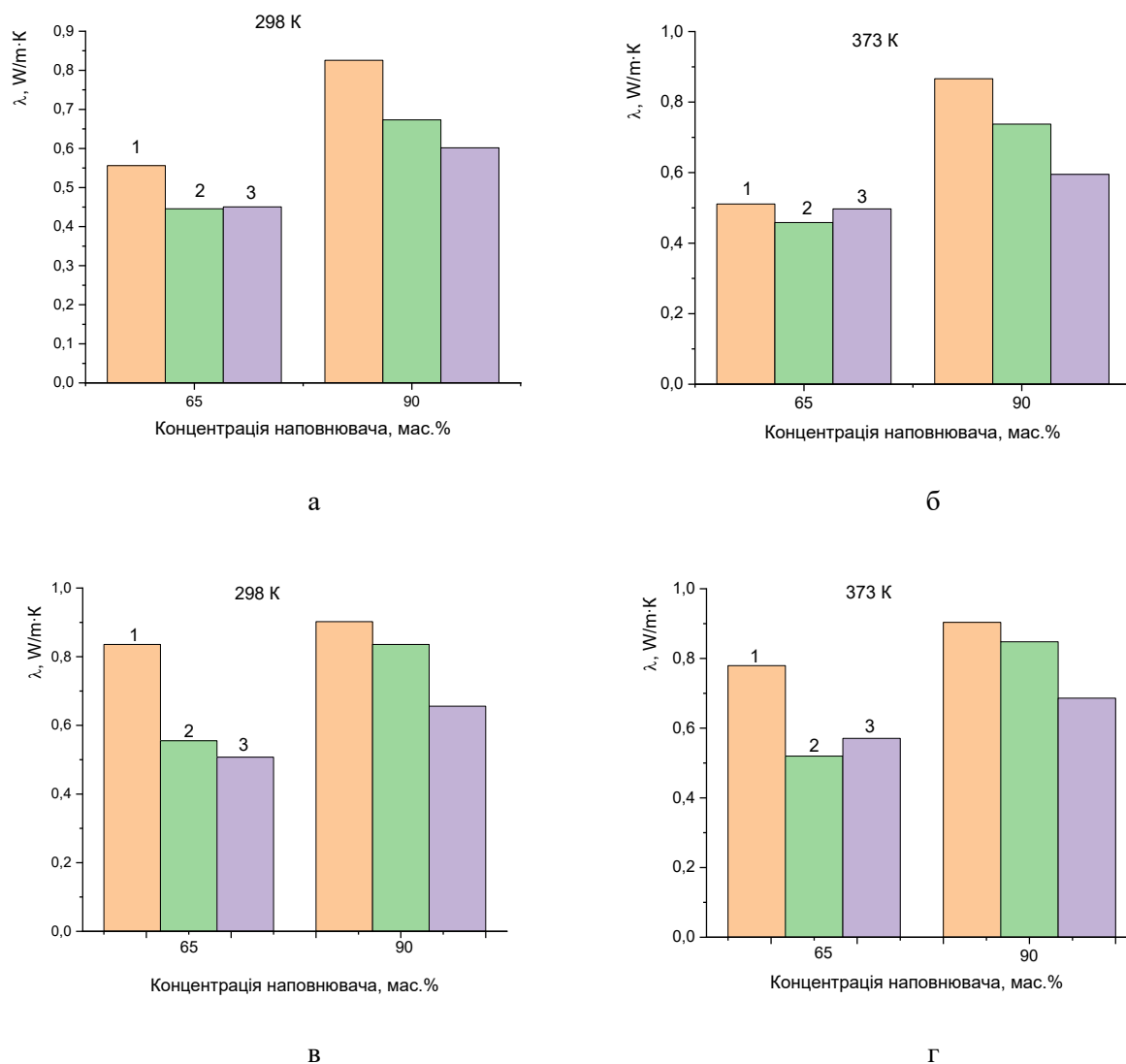


Рис. 1. Залежність теплопровідності від концентрації (за різних температур) для систем на основі Latex 2012 (а, б) та Policril 590 (в, г) з різними наповнювачами: 1 – відсів андезиту, 2 – відсів перліту, 3 – відсів цеоліту

систем. Це дозволяє оцінити, наскільки ефективно високі концентрації диспергованих наповнювачів впливають на теплофізичні властивості композитів.

Дослідження показали (рис. 1), що системи на основі Policril 590 демонструють вищі значення теплопровідності порівняно з Latex 2012. Це пов'язано з кращою змочуваністю та адгезією акрилової дисперсії до частинок наповнювача, що сприяє утворенню більш ефективних теплопровідних шляхів у структурі композиту.

Таким чином, мінералогічний склад, розмір кристалітів і взаємодія з полімерною матрицею є ключовими факторами, які визначають теплофізичні властивості композитів.

Для досягнення високих теплоізоляційних характеристик композитів важливо провести

оптимізацію складу бінарного наповнювача. Правильний вибір комбінацій і пропорцій наповнювачів дозволяє не лише знизити теплопровідність, але й забезпечити збереження механічної цілісності матеріалу та його здатності до технологічної обробки. У цьому дослідженні для оптимізації використано різні підходи до моделювання, які враховують особливості взаємодії наповнювачів у полімерній матриці.

Для систем із високими концентраціями наповнювачів було використано модель перколяції, що враховує утворення теплопровідних шляхів у структурі композиту, які виникають завдяки агломерації частинок і зростанню їх взаємодії.

Окрім цього, модель Хашина-Штрікмана [10] була використана для оцінки верхніх і нижніх меж теплопровідності композитів.

Для систем із високим вмістом наповнювачів найбільш прийнятною виявилася модель Нільсена, яка враховує максимальну частку упаковки частинок, їх орієнтацію та взаємодію. Ця модель дозволяє оптимізувати бінарні комбінації наповнювачів для досягнення мінімальної теплопровідності.

Таким чином, модель Нільсена [11] була обрана як основний інструмент для прогнозування і оптимізації теплоізоляційних характеристик композитів.

$$\frac{\lambda_{KM}}{\lambda_H} = \frac{1 + A \cdot B \cdot \varphi_H}{1 - A \cdot \psi \cdot \varphi_H}, \quad B = \frac{\frac{\lambda_H}{\lambda_H} - 1}{\frac{\lambda_H}{\lambda_H} + A}, \quad \psi = 1 + \left(\frac{1 - \varphi_m}{\varphi_m^2} \right) \cdot \varphi_H$$

де: A – функція геометрії часток, φ_m – максимальна об’ємна частка наповнювача.

Результати моделювання, виконаного на основі цієї моделі, дозволили визначити оптимальні концентрації наповнювачів та їх комбінації, спрямовані на зниження теплопровідності та покращення теплоізоляційних властивостей матеріалів. Детальні результати представлені в таблиці 3.

Проаналізувавши отримані дані (табл. 3) для оптимізації складів полімерних композитів за їх теплопровідністю найбільш придатною є модель Нільсена, що враховує взаємодію між наповнювачами та полімерною матрицею, що робить її придатною для систем із різними типами матриць, зокрема Latex 2012 і Policril 590.

Результати розрахунків у відповідності до моделі Нільсена представлені в таблиці 4.

Розрахунки (табл. 4) базуються на аналізі теплопровідності бінарних систем наповнювачів,

де їх сумарна концентрація становить 75 мас.%. Співвідношення компонентів було обрано з урахуванням індивідуальних теплопровідностей наповнювачів і їх взаємодії, яка моделювалася за допомогою моделі Нільсена.

Зокрема, при комбінуванні наповнювачів, таких як андезит і перліт та андезит і цеоліт значна увага приділялася досягненню мінімальної ефективної теплопровідності композиту. Співвідношення 48 мас.% андезиту та 27 мас.% перліту чи цеоліту показало найкращі результати відповідно 0,182 та 0,184 Вт/м·К. Це пояснюється тим, що андезит має найнижчу власну теплопровідність серед наповнювачів (0,212 Вт/м·К).

В той же час композити з цеолітом і перлітом не зважаючи на їх співвідношення (табл. 4), показали максимальну теплопровідність серед розглянутих бінарних систем на рівні 0,212 Вт/м·К.

Отже, результати аналізу підтверджують, що використання андезиту як основного компонента в бінарних системах дозволяє досягти найкращих теплоізоляційних властивостей композитів. Також слід додати, що тип зв’язуючого, при високих концентраціях наповнювача не вносить суттєвого впливу, при розрахунках за моделлю Нільсена, на значення теплопровідності композитів. При заміні зв’язуючого з Latex 2012 на Policril 590, розраховані значення ефективної теплопровідності для розглянутих систем з бінарними наповнювачами залишались однаковими.

Висновки.

1. Розрахунки розмірів кристалітів наповнювачів показали, що їх мікро- та наноструктурні характеристики суттєво впливають на ефективну

Таблиця 3

Вихідні дані та результати моделювання

Наповнювач	Матриця ПКМ	Об’ємна частка наповнювача	Теплопровідність при 298 К, Вт/м·К			
			Експериментальна	Перколяції	Хашина-Штрікмана (нижня межа)	Нільсена
Цеоліт	Latex 2012	0,458	0,451	0,161	0,161	0,138
		0,804	0,602	0,296	0,192	0,243
	Policril 590	0,464	0,507	0,184	0,176	0,140
		0,808	0,656	0,317	0,204	0,244
Перліт	Latex 2012	0,449	0,446	0,157	0,159	0,133
		0,798	0,673	0,290	0,189	0,237
	Policril 590	0,455	0,555	0,179	0,174	0,135
		0,802	0,836	0,311	0,202	0,238
Андезит	Latex 2012	0,453	0,556	0,146	0,141	0,107
		0,800	0,826	0,252	0,163	0,189
	Policril 590	0,459	0,836	0,168	0,155	0,108
		0,804	0,902	0,272	0,175	0,189

**Оптимізація складів композиту з бінарними наповнювачами
для досягнення ефективної теплопровідності**

Наповнювач 1	Наповнювач 2	Вміст наповнювача 1, мас. %	Вміст наповнювача 2, мас. %	Ефективна теплопровідність (Вт/м·К)
Перліт	Цеоліт	36	39	0,212
Цеоліт	Андезит	48	27	0,198
Андезит	Перліт	27	48	0,193
Перліт	Цеоліт	39	36	0,212
Цеоліт	Андезит	27	48	0,184
Андезит	Перліт	48	27	0,182

теплопровідність полімерних композитів. Визначення розмірів кристалітів із застосуванням рівня Шеррера дозволило встановити, що зменшення розмірів кристалів сприяє покращенню теплоізоляційних властивостей композитів.

2. Вивчено залежність теплопровідності композитів від концентрації наповнювачів і температури. Результати досліджень показали, що підвищення концентрації мінеральних наповнювачів (андезиту, перліту, цеоліту) до 90 мас. % дозволяє підвищити теплопровідність матеріалів.

3. Моделювання теплопровідності композитів за різними моделями підтвердило адекватність застосування моделі Нільсена для системи

із високими концентраціями наповнювачів. Ця модель враховує міжфазні взаємодії, ефекти упаковки частинок і орієнтацію компонентів, що забезпечує високий рівень точності прогнозів.

4. Оптимізація складів композитів проведена для трьох систем бінарних наповнювачів: перліт + цеоліт, перліт + андезит, цеоліт + андезит. Найнижчу теплопровідність продемонстрували комбінації з домінуванням андезиту, наприклад, андезит (48 мас. %) + перліт (27 мас. %), яка склала 0,182 Вт/м·К. Системи цеоліт + перліт, відповідно до збалансованих, мають найвищі значення теплопровідності серед бінарних систем (0,212 Вт/м·К).

Список літератури:

1. Özkan Ş., Ceylan H. The effects on mechanical properties of sustainable use of waste andesite dust as a partial substitution of cement in cementitious composites. *Journal of Building Engineering*. 2022. P. 104959. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104959>
2. Білоусов О.Ю., Черняк Л.П., Шнирук О.М. Пориста кераміка на основі відсівів андезиту. *Modern scientific researches*. 2020. 12(1). P. 12-17. <https://doi.org/10.30889/2523-4692.2020-12-01-001>
3. Çelikten S., Saridemir M., Sologlu M. Effects of elevated temperatures and cooling regimes on the waste andesite dust-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 422. P. 135857. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135857>
4. Structural and physical characteristics of fine perlite expanded with a novel method in a vertical electric furnace / P. M. Angelopoulos et al. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2016. Vol. 125, no. 2. P. 71-80. URL: <https://doi.org/10.1080/03719553.2016.1156244>
5. Applications of zeolites in biotechnology and medicine – a review / L. Bacakova et al. *Biomaterials Science*. 2018. Vol. 6, no. 5. P. 974-989. URL: <https://doi.org/10.1039/c8bm00028j>
6. Мельник Л.І., Свідерський В., Черняк Л. Особливості вулканічних порід як матеріалів для полімерних композитів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. Т.305, № 1. С. 14-19. URL: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-14-19>
7. Liubov Melnyk. Influence of mineral filler on the thermal conductivity of polymer composites. *Technology audit and production reserves*. 2024. Vol. 6. № 80. P. 6-11. URL: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.317659>
8. Alexander J. Blake, William Clegg. (2009). Crystal Structure Analysis. Principles and Practice. Second Edition. *International Union Of Crystallography*. Oxford University Press. P. 251-263.
9. Сіренко Г.О., Свідерський В.П., Складанюк М.Б. Фізичні методи дослідження речовин: Ч.П. Теплофізичні методи та властивості полімерних композитів: монографічний підручник / за ред. Г.О. Сіренка – Івано-Франківськ: Вид. Супрун В.П., 2020, 292 с. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/9824>. ISBN 978-966-8969-867.

10. Weidenfeller, B., Höfer, M., & Schilling, F. R. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle-filled polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004. Vol. 35. № 4, 423-429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.11.005>
11. Nielsen L. The Thermal and Electrical Conductivity of Two-Phase Systems. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1974. Vol. 13. № 1. P. 17-20.

Melnyk L.I., Svidersky V.A., Donii O.M. THE INFLUENCE OF MINERAL FILLERS ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF POLYMER COMPOSITES

The article is focused on the investigation and optimization of the thermal insulation properties of polymer composites with binary mineral fillers, such as andesite, perlite, and zeolite. The use of secondary mineral resources in the composition of composites not only reduces environmental impact but also enables the development of materials with enhanced operational properties. The research is aimed at calculating the optimal ratios of fillers and polymer matrix to achieve the lowest thermal conductivity, which is a critical criterion for thermal insulation materials.

The study includes the calculation of filler crystallite sizes using the Scherrer equation. It was established that the micro- and nanostructural characteristics of fillers play a key role in determining the thermal conductivity of composites. The dependence of thermal conductivity on filler concentration in a wide range (65-90 wt.%) and on temperature from -100 °C to +100 °C was investigated. The analysis showed that increasing the concentration of mineral fillers up to 90 wt.% significantly reduces the thermal conductivity of composites, while the temperature factor has a minimal effect on systems with high filler content.

Several theoretical models were used for thermal conductivity modeling, including the series, parallel, Hashin-Shtrikman, and Nielsen models. In particular, the Nielsen model proved to be the most effective for systems with high filler concentrations, as it considers interfacial interactions, particle packing effects, and orientation. The modeling results confirmed that the system with perlite (27 wt.%) and andesite (48 wt.%) exhibited the lowest thermal conductivity among the studied binary systems – 0.182 W/m·K. Other combinations, such as zeolite (27 wt.%) + andesite (48 wt.%), also demonstrated low thermal conductivity (0.184 W/m·K), confirming the feasibility of using andesite as a primary component.

Combinations of zeolite + perlite, regardless of their ratio, showed the highest thermal conductivity among the studied binary systems (0.212 W/m·K). This is due to the close thermal conductivities of these fillers and the absence of a significant synergistic effect.

Calculations, in contrast to experimental data, showed that the type of polymer matrix has a limited impact on the thermal conductivity of composites with high filler concentrations. The replacement of Latex 2012 with Policril 590 did not result in a significant increase in thermal conductivity, making both binders suitable for thermal insulation materials.

Thus, the conducted research confirmed the effectiveness of using secondary mineral resources to create polymer composites with high thermal insulation properties. The optimization of binary filler compositions allowed for determining the ratios of components that ensure minimal thermal conductivity. The presented results are of great importance for industrial applications in thermal insulation and contribute to reducing environmental impact through the utilization of secondary resources.

Key words: composite, filler, andesite, latex, zeolite, perlite, thermal conductivity, Nielsen model.

УДК 661:606

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/29>**Міміна Н.Б.**Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій**Міміна Ю.О.**Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

ПЕРЕРОБКА ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ВЕРМИКУЛЬТИВУВАННЯМ

Сучасний світ стикається з глобальною проблемою накопичення полімерних відходів, що мають тривалий період розкладу та негативно впливають на екосистеми. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку інноваційних методів утилізації відходів полімерних матеріалів. Проаналізовано переваги вермикультивування порівняно з традиційними методами утилізації, такими як спалювання або захоронення, які супроводжуються значними екологічними ризиками. Вермикультивування є одним із перспективних способів переробки відходів, що поєднує екологічну безпеку та економічну ефективність. У статті досліджено можливість переробки полімерного нетканого матеріалу (спанбонд) методом вермикультивування, розглянуто вплив цього матеріалу на життєдіяльність червоних каліфорнійських черв'яків виду *Eisenia foetida*. Проведено аналіз динаміки біорозкладання спанбонду та визначено оптимальні умови для цього процесу, такі як склад субстрату, рівень вологості та температури. Встановлено, що процес біодеструкції спанбонду відбувається швидше під впливом біологічних об'єктів виду *Eisenia foetida*. Черв'яки можуть впливати на мікробіологічну активність у субстраті, що прискорює біодеструкцію спанбонду. В зразках без додавання у компост черв'яків розкладання було менш вираженим. Спанбонд характеризується високою стійкістю до розкладання, але за наявності органічного субстрату, збагаченого мікроорганізмами та під впливом ферментів, які виділяють черв'яки відбувається поступова зміна фізико-хімічних властивостей матеріалу, зокрема зміна структури волокон і зниження міцності матеріалу, що вказує на процес біодеструкції. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення нових екологічно безпечних технологій утилізації медичних полімерних відходів шляхом поєднання вермикультивування з іншими біотехнологічними підходами.

Ключові слова: біорозкладання, спанбонд, полімерні відходи, переробка, вермикультивування, біогумус, біологічний об'єкт *Eisenia foetida*, екологічна безпека.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток промисловості та зростання споживання матеріалів на основі полімерів, зокрема нетканих матеріалів із спанбонду, створюють серйозну екологічну проблему. Спанбонд використовується у багатьох сферах, таких як медицина (одноразовий одяг і маски), сільське господарство (мульчувальні матеріали), пакування тощо. Завдяки своїй довговічності та стійкості до розкладання цей матеріал накопичується в навколишньому середовищі, спричиняючи забруднення ґрунтів, водних ресурсів і повітря [1].

Традиційні методи утилізації, такі як спалювання, захоронення супроводжуються викидами токсичних речовин (діоксини, фурани, оксиди азоту, сірчаний ангідрид, вуглекислий газ, чадний газ, важкі метали) та призводять до накопичення у навколишньому середовищі, що негативно сприяє на екосистеми та людину [2]. Таким чином, існує гостра потреба у розробці нових

екологічно безпечних і ефективних методів переробки та утилізації полімерних відходів. Одним із перспективних підходів є використання біологічних методів, зокрема вермикультивування [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нетканый синтетичний матеріал (спанбонд) широко використовується в медицині, сільському господарстві та будівництві. Через його стійкість до розкладання, накопичення спанбонду становить екологічну проблему. Використання вермикультивування для переробки органічних відходів є перспективним методом біорозкладання. Деякі науковці досліджують можливість розкладання синтетичних полімерів за участю дощових черв'яків. Авторами доведено, що вони можуть сприяти розкладанню поліпропілену, одного з компонентів спанбонду [4]. Однак ці результати не можна безпосередньо застосувати до спанбонду через його специфічний склад і структуру. Інші дослідники [5] розглядають можливість розкла-

дання поліпропілену за допомогою бактерій, які виділені із кишечника воскових черв'яків. Японські вчені методом хімічно-структурних досліджень вивчали механізми впливу кишкових мікроорганізмів дощових черв'яків на полімерні матеріали. Їхні дослідження свідчать, що мікрофлора кишкового тракту черв'яків має здатність частково руйнувати полімерні зв'язки, що сприяє їхньому біорозкладанню. Результати показали, що розкладання поліпропілену є повільним процесом і потребує додаткових досліджень [6]. Отже, вермикультивування має потенціал для біорозкладання синтетичних полімерів, але необхідні подальші дослідження для оцінки його ефективності.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження біорозкладання полімерного матеріалу медичного призначення (спанбонду) вермикультурою *Eisenia fetida* при оптимальних умовах.

Виклад основного матеріалу. У статті розглянуто біодеструкцію одноразових хірургічних шапочок методом вермикультивування, що дозволяє залучати біологічні об'єкти для переробки медичних полімерних відходів, які традиційно вважаються складними для біорозкладу.

Для проведення експерименту обрали вид червоних каліфорнійських черв'яків *Eisenia fetida*, оскільки вони активно переробляють органічні матеріали. Використовували ферментований субстрат на основі модифікованого соняшникового лушпиння. Зразки спанбонду на основі поліпропілену (PP) розміром 15x2 см помістили у прозорі контейнери об'ємом 1 літр при оптимальних умовах температури 15–25°C, вологості субстрату 60–80 %.

Для експерименту створено дві дослідні групи: перша зі зразків спанбонду в умовах вермикультивування з *Eisenia fetida*; друга без черв'яків. Зважування проводили на торсіонних вагах WT-500, мікроскопіювали зразки на оптичному приладі Digital Microscope MM-2288-5X-BN, вимірювали температуру, електропровідність, рівень pH на приладі Hanna HI 991300. Експеримент на міцність проводили за допомогою розривної машини PMI-5, яка дозволяє вимірювати силу, необхідну для розриву матеріалу під впливом навантаження. Для цього зразки спанбонду піддавалися поступовому натягу до моменту їх розриву. Поведінка матеріалу під час навантаження дозволяло оцінити механічні властивості спанбонду та його здатність витримувати різні рівні навантаження. Визначення розривної міцності здійснювалося згідно з ISO 9073-3 [7].

Тривалість експерименту складала 50 діб. Кожні 20 днів зважували зразки спанбонду та перевіряли стан матеріалу за допомогою цифрового мікроскопа при збільшенні у 200 разів. Фіксували зміни у структурі, розмірі та стані спанбонду (рис. 1). Спостерігали за поведінкою черв'яків, які взаємодіяли з матеріалом. Біорозкладання зразків відбувалось за рахунок біологічної активності мікроорганізмів і черв'яків.

Вивчення поверхні зразків на 20 добу в процесі вермикультивування показали, що пористі поліпропіленові волокна майже не змінили своєї структури, відповідно до вихідного матеріалу спанбонд, на 60 добу рельєф волокон почав змінюватись, про що свідчить зміна розмірів і форми

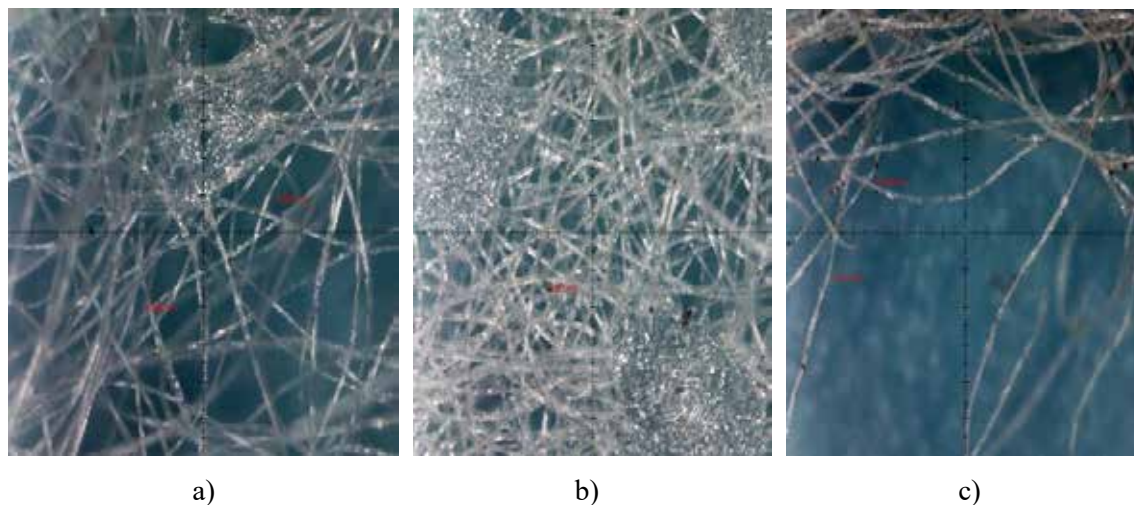


Рис. 1. Результати оптичних досліджень поверхні зразків PP матеріалу спанбонд після біодеструкції у вермикомпості а) первинний зразок, б) зразок у звичайному субстраті, с) зразок у субстраті з культурою *Eisenia fetida*

волокон, порушення суцільності шару досліджуваних матеріалів.

На графіку зображено порівняння ефективності біологічного розкладу нетканого матеріалу спанбонд у субстраті (рис. 2).

Зменшення маси зразків спанбонду підтверджує, що черв'яки сприяють біорозкладу. Діяльність черв'яків сприяє прискоренню мінералізації органічних компонентів, а їх травна система сприяє кращому переведенню матеріалів у формі, доступній для подальшого розкладу мікроорганізмами. Це також свідчить про потенціал використання черв'яків для переробки певних типів відходів, таких як органічні матеріали або біорозкладні полімери, у компостуванні чи інших біологічних процесах.

В процесі дослідження визначали, як присутність культури *Eisenia foetida* впливає на електропровідність субстрату та на процеси біорозкладання матеріалу спанбонд, оскільки зменшення електропровідності свідчить про зміни в складі середовища (збільшення концентрації іонів, продуктів життєдіяльності черв'яків чи мікробіологічної активності).

Електропровідність в обох зразках стала меншою (рис. 3), це свідчить про кілька можливих процесів у середовищі, які впливають на біодеградацію або хімічні зміни в субстраті. У процесі біорозкладання розчинені іони (солі, органічні кислоти) можуть зменшуватися, що веде до зниження електропровідності. Це результат погли-

нання іонів органічних кислот мікроорганізмами, черв'яками або іншими організмами, які беруть участь у розкладі матеріалу.

Розмір волокон первинного зразка спанбонду складав 0,021 мкм, по завершенню експерименту розмір волокон зразка, який знаходився у субстраті зі *Eisenia fetida* зменшився до 0,008 мкм, а той що знаходився у субстраті до 0,014 мкм. Вермикомпостування сприяє сприйняттю розкладання матеріалів за рахунок активності мікроорганізмів і ферментів, що виділяються черв'яками.

На рисунку 4 зображено порівняльну динаміку біорозкладання матеріалу спанбонд в субстратах з *Eisenia fetida* та без них, показано їх вплив на структуру та цілість волокон.

Наведені дані вказують на більший вплив культури *Eisenia foetida* на деградацію волокон, разом зі звичайним субстратом. Змінення розмірів волокон зумовлене тим, що деякі мікроорганізми, що симбіотично живуть із вермикультурою, можуть виробляти ферменти або хімічні речовини, здатні атакувати полімерний матеріал. Це спричинило руйнування полімерних зв'язків і зміну морфології волокон.

В процесі вермикомпостування, субстрат проходячи через кишечник *Eisenia foetida*, має стабілізований рівень кислотності. При традиційному компостуванні або у природних умовах при розкладанні органічних відходів в ґрунт вивільняються органічні кислоти. У процесі проведення дослідів постійно контролювалися показники рН (рис. 5).

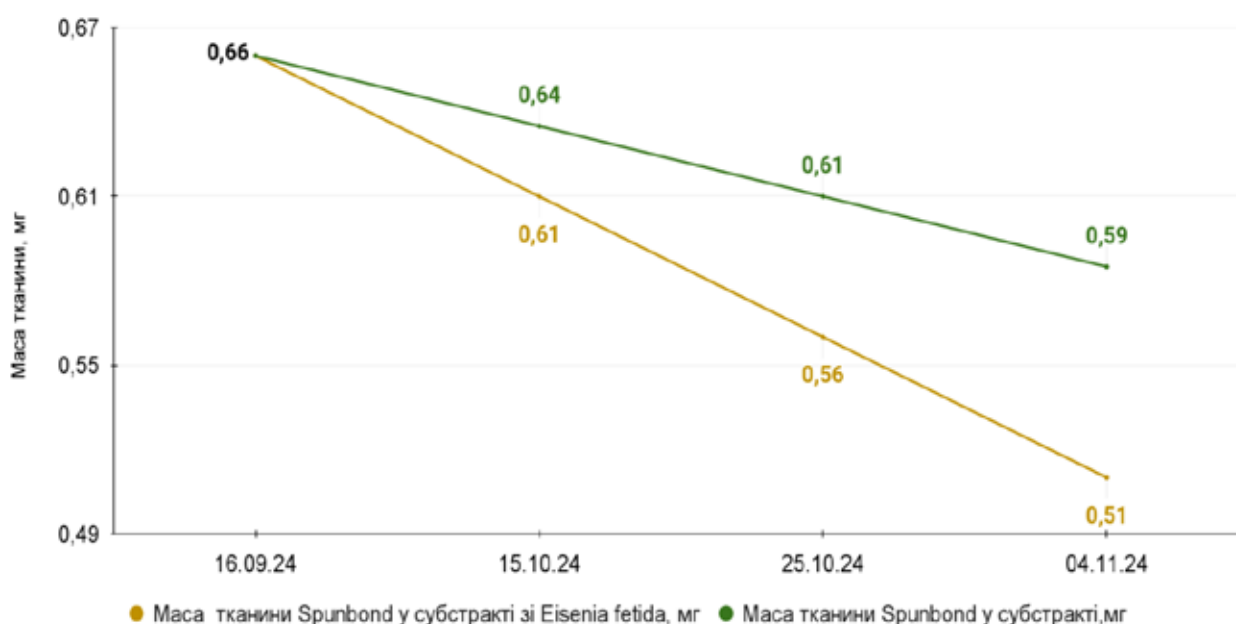


Рис. 2. Порівняння ефективності біологічного розкладу нетканого матеріалу спанбонд у субстраті

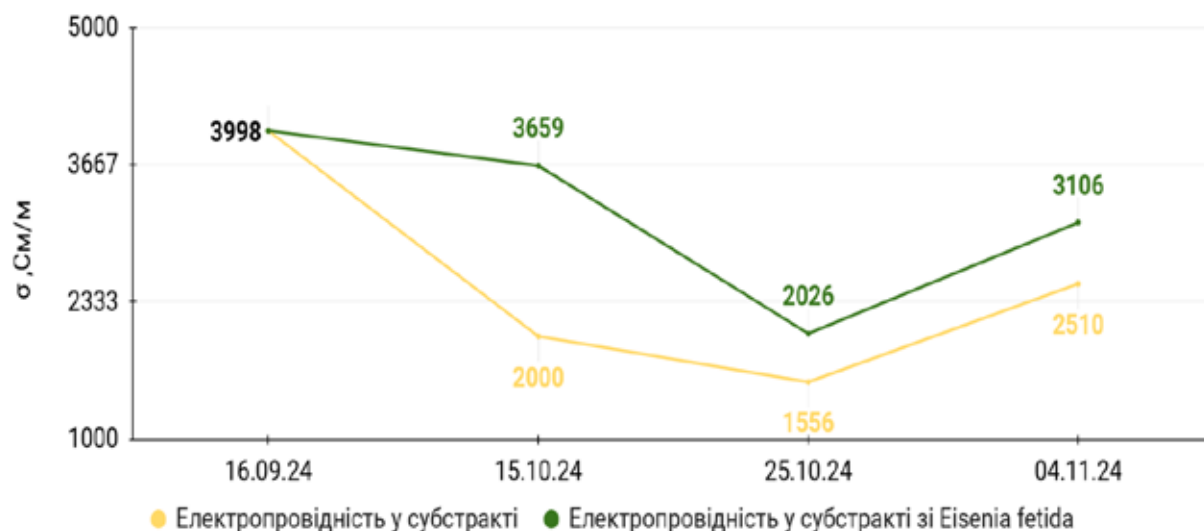


Рис. 3. Зміна електропровідності в експериментальних групах

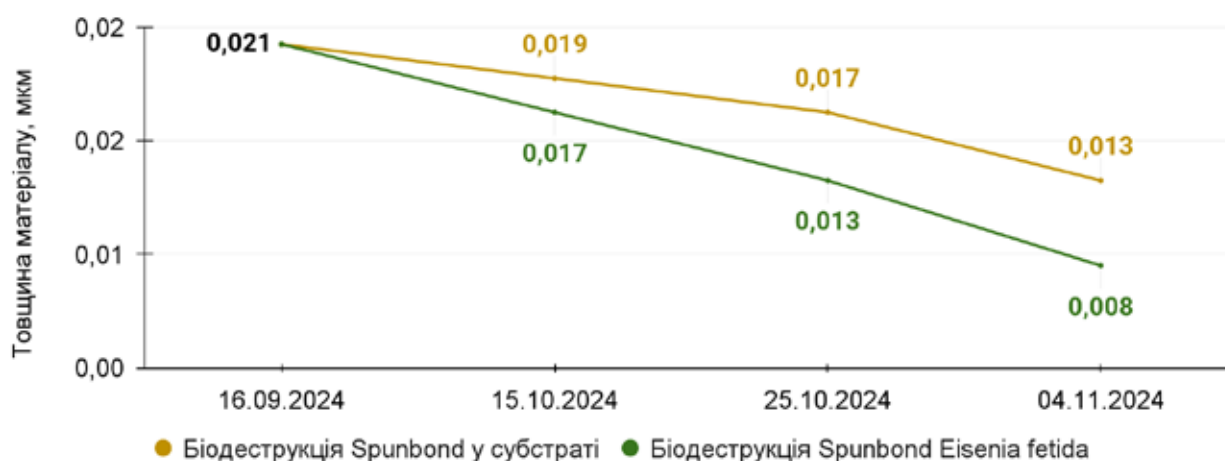


Рис. 4. Порівняльна динаміка біодеструкції матеріалу спанбонд в субстратах з *Eisenia fetida* та без них

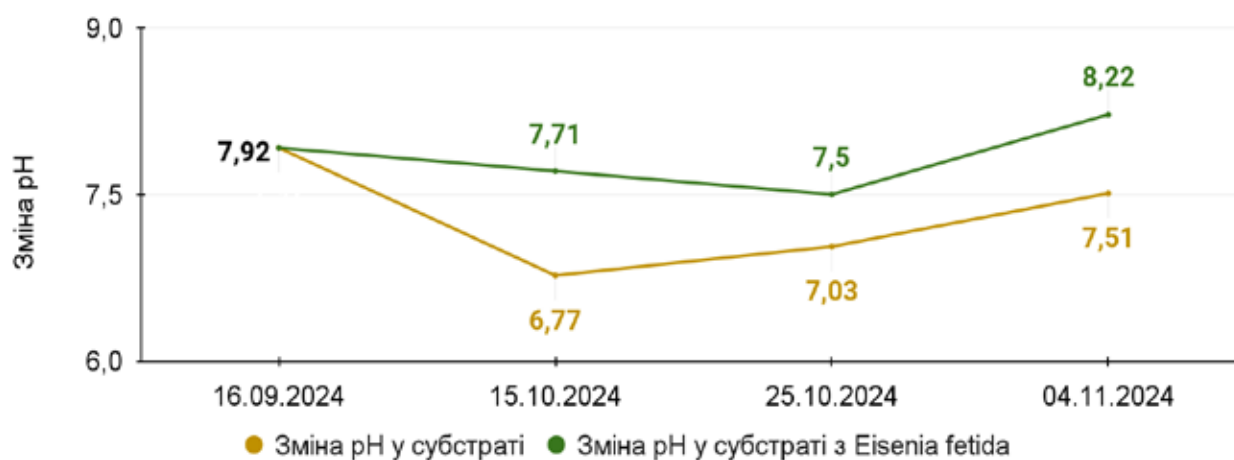


Рис. 5. Графік зміни pH під впливом мікробіологічної активності

Отже, кінцеві значення рН досліджуваних зразків спанбонд, які піддавались вермикомпостуванню з участю *Eisenia foetida* мають тенденцію до збільшення значення рН, через вивільнення органічних кислот в процесі розкладання субстрату. Збільшення рН у субстраті, що містить поліпропілен та черв'яків, може свідчити про кілька процесів:

- черв'яки самі по собі виділяють аміак у незначній кількості, їх діяльність (переробка органічних речовин) сприяє зростанню активності мікроорганізмів, які розкладають азотисті сполуки і можуть вивільняти аміак у компост;
- поліпропілен може бути частиною органічного матеріалу, який через мікробіологічні процеси вивільняє аміак або інші лужні з'єднання.

З графіка на рисунку 6 видно, що зниження механічних властивостей, таких як міцність на розрив, чітко виражено через структурні зміни матеріалу, спричинені біорозкладанням. Це дозволяє оцінити швидкість розкладання матеріалу, його вплив на навколишнє середовище та придатність до використання в біологічно активних середовищах.

У процесі вермикультивування спостерігається поступове зменшення міцності матеріалу спанбонду, що виявляється через появу мікротріщин, розшарування та зниження механічних властивостей. Це пояснюється активністю каліфорнійських черв'яків, які фізично руйнують структуру матеріалу, а також присутністю мікроорганізмів, що сприяють частковому розкладу полімеру.

Зменшення міцності матеріалу є свідченням того, що вермикультивування може бути корисним для часткового зниження стабільності спанбонду, але для досягнення значної біодеградації матеріал потребує додаткових модифікацій або поєднання з іншими методами утилізації.

Висновки. Дослідженнями встановлено, що процес біорозкладання нетканних матеріалів, які використовуються в медицині, а саме спанбонд, відбувається швидше під впливом біологічних об'єктів виду *Eisenia foetida*. В зразках без черв'яків розкладання було менш вираженим. Виявлено, що в процесі вермикультивування відбувається поступова зміна фізико-хімічних властивостей спанбонду, зокрема зміна структури волокон і зниження міцності матеріалу.

Біодеструкція спанбонду в субстраті з *Eisenia fetida* відбулася швидше, ніж у субстраті без них, враховуючи такі фактори:

- черв'яки активно перемішують субстрат, прокладаючи проходи і переміщуючи матеріал через свої системи травлення. Механічне пошкодження волокон спанбонду сприяє його швидшому розкладанню;
- черв'яки сприяють зростанню мікроорганізмів (бактерій, грибів), які розкладають органічні матеріали. Вони виділяють ферменти, які прискорюють біодеструкцію спанбонду;
- присутність черв'яків змінює умови в субстраті (підвищує вологість, змінює рН), що також сприяє біодеструкції матеріалу.

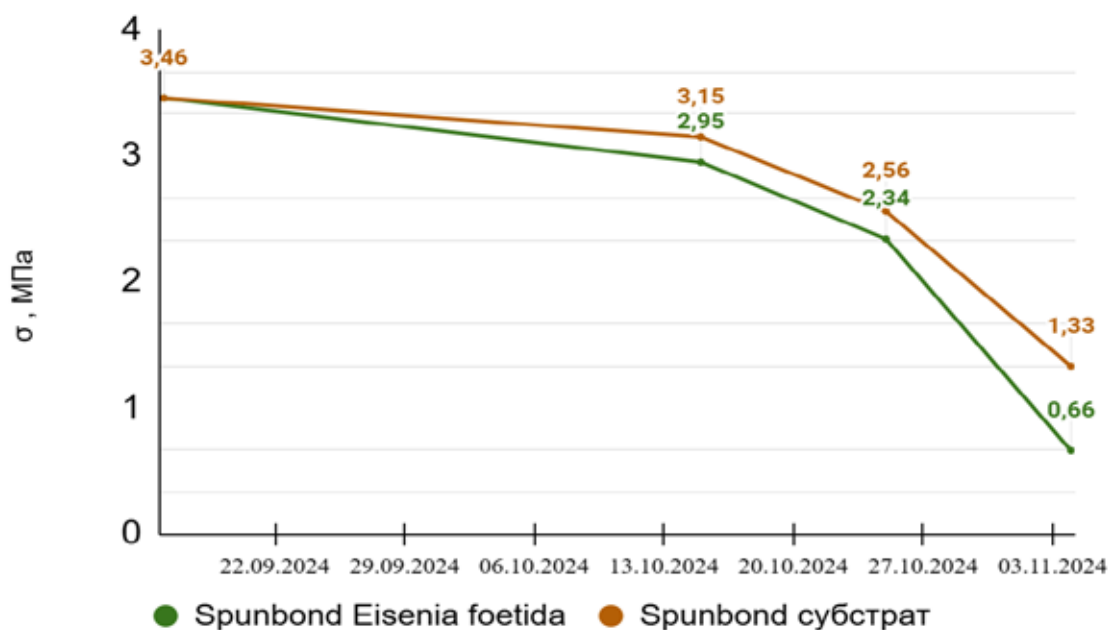


Рис. 6. Залежність міцності на розрив від субстрату

Результати дослідження показують, що процес вермікультивування сприяє розкладанню поліпропіленового спанбонду за рахунок поєднання механічного руйнування матеріалу черв'яками та дії мікроорганізмів, які активно розвиваються в їхньому середовищі. Дослідження демонструє

потенціал використання вермікультивування для зменшення негативного впливу спанбонду на довкілля. Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення технологій біорозкладання шляхом поєднання вермікультурних методів із іншими біотехнологічними підходами.

Список літератури:

1. Мітіна Н.Б., Мініна Ю.О., Герасименко В.О. Оцінка здатності до розкладання матеріалу Meltblown під час вермікультивування. Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування [Електронний ресурс]: матеріали Міжнар. наук. конф., Харків 27-28 квітня 2023. С. 131-132
2. Matsunaga, A. Biodegradation Behavior of a Sheath frasl; Core Type of Bi-component Spunbond Nonwovens Made from Poly (butylene succinate) frasl; Poly(lactic acid). 2012. Sen'i Gakkaishi, 68(8), 218–224. doi:10.2115/fiber.68.218
3. Дослідження умов біодеградації полімер-полімерних сумішей в процесі вермікультивування / Мініна Ю.О., Мітіна Н.Б., Третяков А.О. / Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідectvo про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року). Том 35 (74) № 1 2024. – с. 113-117
4. Ghatge, Sunil & Yang, Youri & Ahn, Jae-Hyung & Hur, Hor-Gil. (2020). Biodegradation of polyethylene: a brief review. Applied Biological Chemistry. 63. 10.1186/s13765-020-00511-3.
5. Ali, Sameh & Elsamahy, Tamer & Zhu, Daochen & Sun, Jianzhong. (2023). Biodegradability of polyethylene by efficient bacteria from the guts of plastic-eating waxworms and investigation of its degradation mechanism. Journal of Hazardous Materials. 443. 130287. 10.1016/j.jhazmat.2022.130287.
6. Xiang Yun Debbie Soo, Suxi Wang, Chee Chuan Jayven Yeo, Jiuwei Li, Xi Ping Ni, Lu Jiang, Kun Xue, Zibiao Li, Xunchang Fei, Qiang Zhu, Xian Jun Loh, Polylactic acid face masks: Are these the sustainable solutions in times of COVID-19 pandemic?, Science of The Total Environment, Volume 807, Part 3, 2022, 151084, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151084>.
7. ДСТУ ISO 9073-3:2003 Матеріали текстильні. Методи випробування нетканних матеріалів. Частина 3. Визначення розривального навантаження та видовження під час розриву (ISO 9073-3:1989, IDT)

Mitina N.B., Mitina Yu.O. PROCESSING OF POLYMERIC WASTE BY VERMICULTURE

The modern world is facing a global problem of accumulating polymeric waste that has a long decomposition period and negatively affects ecosystems. In this regard, there is a need to find innovative methods for the utilization of waste polymeric materials. The article analyzes the advantages of vermiculture compared to traditional methods of disposal, such as incineration or disposal, which are accompanied by significant environmental risks. Vermiculture is one of the most promising methods of waste recycling that combines environmental safety and economic efficiency. The article investigates the possibility of processing polymeric nonwoven material (spunbond) by vermiculture, and considers the impact of this material on the vital activity of red California worms of the species Eisenia foetida. The dynamics of spunbond biodegradation was analyzed and the optimal conditions for this process, such as substrate composition, humidity, and temperature, were determined. It was found that the process of spunbond biodegradation is faster under the influence of biological objects of the Eisenia foetida species. Worms can affect the microbiological activity in the substrate, which accelerates the biodegradation of spunbond. In samples without the addition of worms, decomposition was less pronounced. Spunbond is characterized by high resistance to decomposition, but in the presence of an organic substrate enriched with microorganisms and under the influence of enzymes secreted by worms, there is a gradual change in the physical and chemical properties of spunbond, in particular, a change in the fiber structure and a decrease in the strength of the material, which indicates the process of biodegradation. Further research can be aimed at improving new environmentally friendly technologies for the disposal of medical polymer waste by combining vermiculture with other biotechnological approaches.

Key words: biodegradation, spunbond, polymeric waste, recycling, vermiculture, vermicompost, biological object Eisenia foetida, environmental safety.

УДК 666.3-1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/30>**Морозова О.М.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Федоренко О.Ю.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Геворкян Е.С.

Український державний університет залізничного транспорту

ВИКОРИСТАННЯ СТАТИСТИКИ ВЕЙБУЛЛА В ОПИСІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Стаття присвячена дослідженню застосування статистики Вейбулла для моделювання механічних характеристик оксидної кераміки, зокрема кераміки на основі діоксиду цирконію (ZrO_2). Оксидна кераміка є однією з найбільш широко використовуваних керамічних систем у сучасній промисловості. Зокрема, кераміка ZrO_2 має високу міцність, зносостійкість, хімічну стійкість і біосумісність, що робить її ідеальним матеріалом для застосування в різних галузях. Так, наприклад, імплементація керамічних матеріалів в галузі біомедицинської інженерії й кісткових імплантантів показала, що механічні властивості та надійність керамічних систем є найсуттєвішими факторами, що регулюють надійність матеріалів. Кераміка ZrO_2 відома своєю високою міцністю, зносостійкістю, хімічною стійкістю та біосумісністю, що робить її придатною для застосування в різних галузях, включаючи біомедицину інженерію та кісткові імплантати. Проте її основні обмеження пов'язані з низькою ударною міцністю і тріщиностійкістю. Для керамічних матеріалів, що зазнають дії механічних впливів, оцінка однорідності структури та відтворюваності механічних характеристик має особливо важливе значення. Для подолання цих проблем використовується статистичний аналіз Вейбулла, який описує ймовірність руйнування керамічних матеріалів при різних навантаженнях. Статистичний аналіз Вейбулла є ефективним методом оцінки надійності керамічних матеріалів, а також може бути застосований для аналізу статистики життєвого циклу матеріалу. У роботі проаналізовано моделі Вейбулла та методи оцінки її параметрів, зокрема методи найменших квадратів, максимальної правдоподібності та метод моментів. Представлено результати досліджень міцності на вигин зразків діоксиду цирконію та впливу дефектів і температури на їх міцність. Дослідження показують, що статистика Вейбулла є ефективним інструментом для оцінки однорідності і надійності керамічних матеріалів.

Ключові слова: керамічні матеріали, надійність, модель Вейбулла, оксидка кераміка, якість.

Постановка проблеми. Відомо, що основними обмеженнями кераміки для конструкційних і спеціальних не конструкційних застосувань є низька ударна міцність і тріщиностійкість, що створює складнощі під час експлуатації різних деталей і конструкцій із цих матеріалів. Характеристики міцності кераміки зазвичай розкидані, тому для розуміння механічних характеристик цього матеріалу необхідний статистичний аналіз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Статистика Вейбулла широко використовується для опису статистичної поведінки механічних властивостей багатьох матеріалів, зокрема сучасної кераміки, скла, металоматричних композитів, керамічних матричних композитів і полімерних матричних композитів. Одним із способів визначення критерію надійності керамічних матеріалів

є статистичний аналіз Вейбулла, у якому модуль Вейбулла m вважається мірою надійності кераміки. Високе значення m свідчить про те, що матеріал має високий ступінь однорідності властивостей та високу надійність.

Постановка завдання. Метою статті є літературний огляд застосування статистики Вейбулла для моделювання різноманітних механічних і фізико-механічних характеристик керамічних матеріалів, зокрема кераміки на основі діоксиду цирконію.

Виклад основного матеріалу. Модель Вейбулла може бути використана для оцінки ймовірності руйнування зразків керамічних матеріалів за різних схем випробувань, впливу дефектів і температури на міцність керамічних матеріалів. У разі керамічних матеріалів, модель може бути

використана для опису ймовірності руйнування зразка при заданому навантаженні. Загалом, дво-параметрична форма функції Вейбулла застосовується для визначення сукупної ймовірності руйнування Р компонента або зразка за заданої прикладеної напруги σ :

Модель Вейбулла може бути використана для оцінки ймовірності руйнування зразків керамічних матеріалів за різних схем випробувань, впливу дефектів і температури на міцність керамічних матеріалів. У разі керамічних матеріалів, модель може бути використана для опису ймовірності руйнування зразка при заданому навантаженні. Загалом, двопараметрична форма функції Вейбулла застосовується для визначення сукупної ймовірності руйнування Р компонента або зразка за заданої прикладеної напруги σ :

$$P = 1 - e^{[-(\sigma/\sigma_0)^m]} \quad (1)$$

де m – модуль Вейбулла; σ_0 – параметр масштабу, що має ту саму розмірність, що й напруга [1, с. 149].

Параметри моделі Вейбулла m і σ_0 можна оцінити різними методами, зокрема методом найменших квадратів, методом максимальної правдоподібності та методом моментів [2, с. 372; 3, сс. 252-254; 4, сс. 1745-1746].

Авторами [5, сс. 875-876; 6, с. 450] було запропоновано емпіричне рівняння для визначення модуля Вейбулла m_{es} за коефіцієнтом варіації (c_v) вимірної міцності на руйнування:

$$m_{es} = \frac{\alpha}{(c_v)^f} + \beta \quad (2)$$

де α і β – константи, що залежать від розміру вибірки, і були визначені та сформульовані шляхом аналізу даних, отриманих за допомогою моделювання Монте-Карло. Слід зазначити, що цей метод дає змогу визначити модуль Вейбулла m_{es} , а для визначення параметра σ_0 використовують згадані вище методи.

Теорія Вейбулла, заснована на концепції руйнування найслабшої ланки для розподілу міцності керамічних матеріалів, може бути ефективно описана в математичних термінах [7, с. 80]. У такому разі, ключовим припущенням є те, що руйнування виникає внаслідок єдиного типу руйнування, а саме структурної неоднорідності. Згідно з цим підходом, поведінку міцності можливо описати за допомогою особливої форми розподілу екстремальних значень, так званим розподілом Вейбулла, що встановлює кореляцію між механічним навантаженням і ймовірністю руйнування деталі, за умови, що параметри розподілу відомі. Використовуючи рівень міцності, за якого ймовірність руйнування стає рівною 63,2% (σ_0), модуль Вейбулла (m) стає мірою розподілу міцності. Чим вищий модуль Вейбулла, тим більш однорідним є матеріал. Це означає, що однорідні "дефекти" рівномірно розподілені по всьому об'єму, а також тим вужча крива ймовірності розподілу міцності розподілу. Сучасні досягнення демонструють значення в діапазоні $10 < m < 20$. Ці значення визначаються для керамічних матеріалів зазвичай за допомогою методу чотирьохточкового вигину, оскільки вимірювання міцності на розтягнення цих матеріалів надзвичайно складне:

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right\} \quad (3)$$

де F – вірогідність відмов; σ_u – параметр порогової напруги (зазвичай $\sigma_u = 0$); σ_0 – масштабний параметр або характерна міцність (середнє значення нормального розподілу).

Слід зазначити, що параметр порогової напруги, σ_u , являє собою мінімальну напругу, нижче якої випробуваний зразок не зруйнується. Масштабний параметр або характерна міцність, σ_0 , залежить від конфігурації напруги та розміру зразка для випробування. Параметр форми розподілу, m , являє собою модуль Вейбулла [1, с. 151]. Статистика Вейбулла дає змогу розрахувати значення міцності деталей залежно від їхнього об'єму, а протокол випробувань із визначення модуля Вейбулла зазначено в DIN EN 843-5 і DIN 51 110-3 [8, с. 7].

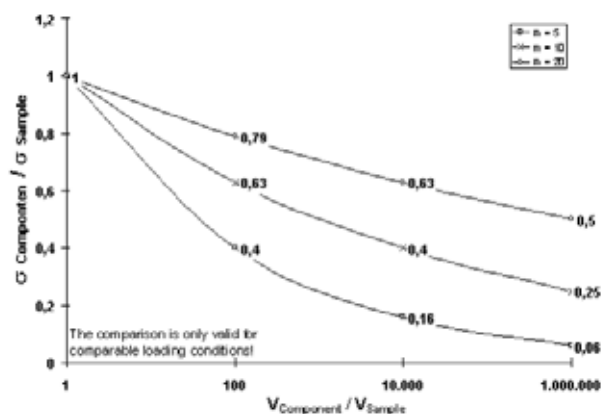


Рис. 1. Залежність міцності від розмірів деталі для різних значень модуля Вейбулла, m . [9, с. 81]

Автори [9, с. 229] визначали міцність на вигин зразків діоксиду цирконію з подальшою оцінкою результатів за допомогою різних методів оцінки статистики Вейбулла. Кумулятивна функція розподілу для розподілу Вейбулла визначалася згідно з:

Таблиця 1

Розрахункові параметри Вейбулла

Зразки	Оцінювання за методом найменших квадратів середнього рангу (95% CI), EXCEL	Оцінювання за медіанним рейтингом методу найменших квадратів (95% CI)	Оцінювання методом максимальної ймовірності (95% CI)	Оцінювання з поправкою на максимальну ймовірність (95% CI)
Контрольна група (DCS, Allschwill, Швейцарія)	6.4	7.1 (3.1,15.9) ^a	10.1 (6.6,15.6) ^a	(5.8,14.2)
ZE (ZENO ZR Wieland, Pforzheim, Німеччина)	5.1	5.0 (3.0,8.2) ^a	5.7 (3.7,8.7) ^a	5.2 (3.2,8.0)
GC (GC ZR Disc GC Europe, Leuven, Бельгія)	7.5	7.2 (4.3,12.0) ^a	8.3 (5.5,12.6) ^a	7.6 (4.8,11.7)
CZ (Ceramill ZI Amann Girsbach, Koblach, Австрія)	6.2	6.8 (5.0,9.1) ^a	5.6 (3.8,8.2) ^a	5.0 (3.2,7.8)
CY (Coprano YZ White Peak, Essen, Німеччина)	5.3	5.1 (3.1,8.4) ^a	5.9 (3.8,8.9) ^a	5.3 (3.3,8.2)
IC (InCoris ZI F0.5 Sirona Dental, Bensheim, Німеччина)	7.5	7.3 (4.1,12.6) ^a	8.8 (5.8,13.3) ^a	8.0 (5.0,12.3)
VI (Vita In-Ceram YZ, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Німеччина)	8.5	8.7 (6.4,11.7) ^a	7.4 (5.1,10.8) ^a	6.8 (4.2,10.4)
CC (Circon ZR, DeguDent, Hanau, Німеччина)	5.7	5.5 (3.2,9.5) ^a	6.6 (4.3,10.0) ^a	6.0 (3.8,9.3)
LZ (LAVA Zirkon3M, ESPE, Seefeld, Німеччина)	8.9	9.8 (7.5,12.9) ^a	7.7 (5.3,11.2) ^a	7.0 (4.4,10.8)
p-величина		p = 0.207	p = 0.357	
Контрольна група	1772	1751 (1619,1894) ^a	1733 (1645,1826) ^a	(1625,1848)
ZE (ZENO ZR)	994	993 (891,1106) ^c	992 (902,1089) ^c	(883,1112)
GC (GC ZR Disc)	935	935 (868,1007) ^d	932 (875,994) ^d	(862,1009)
CZ (Ceramill ZI)	1289	1274 (1174,1381) ^b	1289 (1171,1419) ^b	(1147,1448)
CY (Coprano YZ)	1222	1220 (1099,1354) ^{bc}	1217 (1111,1333) ^{bc}	(1089,1361)
IC (InCoris ZI F0.5)	1032	1025 (952,1104) ^c	1021 (960,1085) ^c	(947,1100)
VI (Vita In-Ceram YZ)	1171	1166 (1094,1242) ^c	1174 (1091,1262) ^c	(1075,1282)
CC (Circon ZR)	938	937 (851,1032) ^{cd}	932 (860,1011) ^{cd}	(844,1029)
LZ (LAVA Zirkon)	992	984 (929,1041) ^c	994 (926,1066) ^c	(913,1081)
p- величина		p <0.001	p <0.001	-

$$G(X) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x - S_0}{S} \right)^m \right\}, \quad (4)$$

при $S_0=0$, густина рівна

$$g(x) = \frac{m}{S} \left(\frac{x}{S} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x}{S} \right)^m \right\}. \quad (5)$$

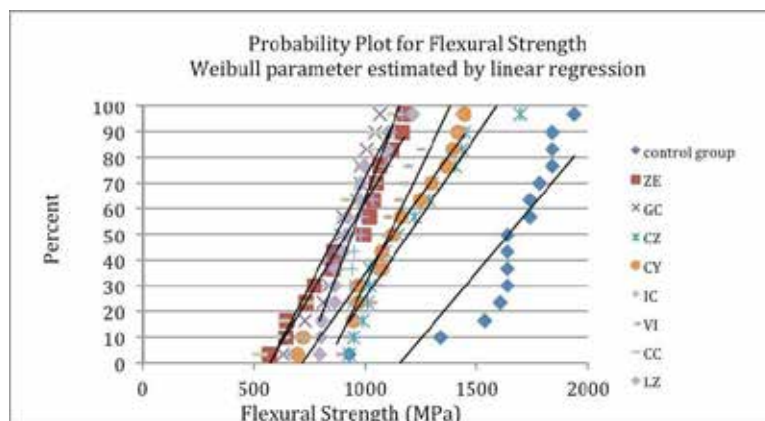
Вибірка становила 9 груп, кожна група складалася з 15 зразків. Результати випробувань наведено в таблиці 1, а також зображено на рис. 2.

Використання припущення про розподіл Вейбулла дало змогу виявити статистичні відмінності в середній міцності на вигин (μ) нормальної та характеристичної міцності (s).

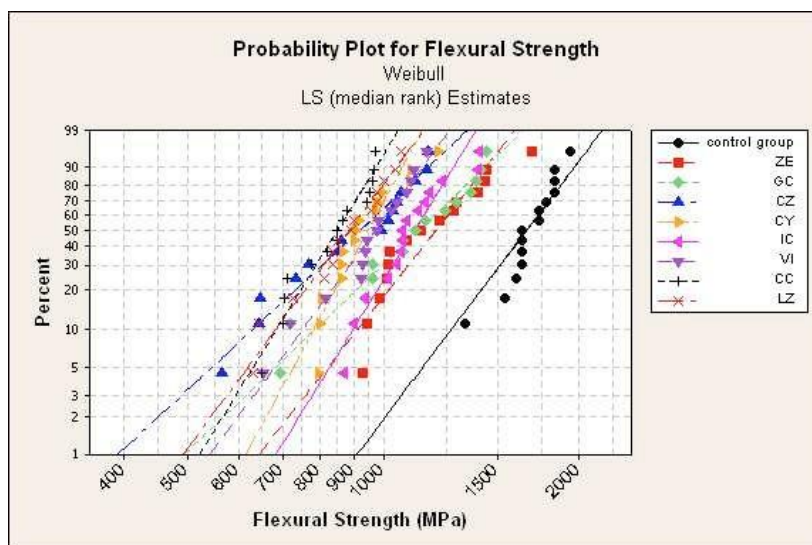
На рис. 3 представлено розподіл Вейбулла, побудований для тридцяти дев'яти комерційних гнучких зразків (штапиків) з діоксиду цирконію

3Y-TZP розміром $3 \text{ мм} \times 4 \text{ мм} \times 45 \text{ мм}$, випробування яких проводили на 4-точкових пристосуваннях розміром $20 \text{ мм} \times 40 \text{ мм}$. Фрактографічний аналіз, проведений для кожного зразка вибірки, засвідчив, що більшість дефектів, що обмежують міцність, були об'ємно розподіленими порами діаметром від 10 до 20 $\mu\text{м}$. Руйнування 6 найслабших зразків спричинене такими особливо великими дефектами, як композиційні неоднорідності, включення і грубі пори, що тягне за собою нерівномірність патерну міцності [10, с. 143]. Правильний аналіз цього набору даних вимагає використання статистичного аналізу, описаного в [11, с. 5].

Дослідження тетрагонального полікристалічного діоксиду цирконію, стабілізованого 3% моль-ітрієм (3Y-TZP) (середній розмір зерна



а



б

Рис. 2. Графік імовірності для параметра Вейбулла, оціненого методом найменших квадратів (а – середній ранг в EXCEL, б – медіанний ранг в MINITAB) [9, с. 231]

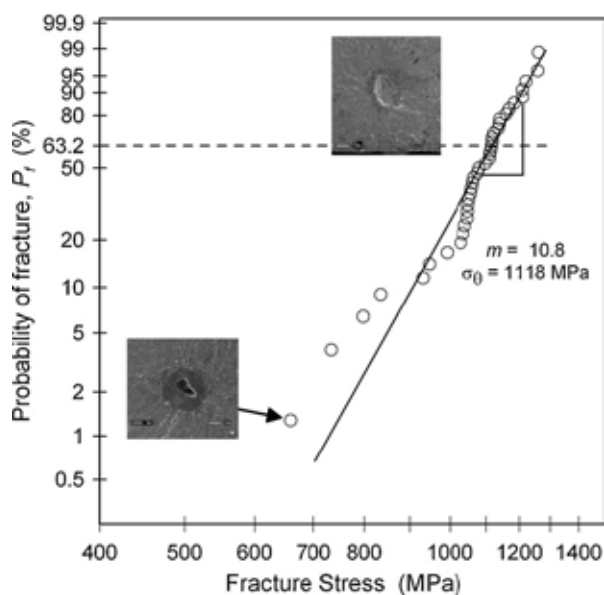


Рис. 3. Міцність на вигин зразків із діоксиду цирконію 3Y-TZP [10, с. 141]

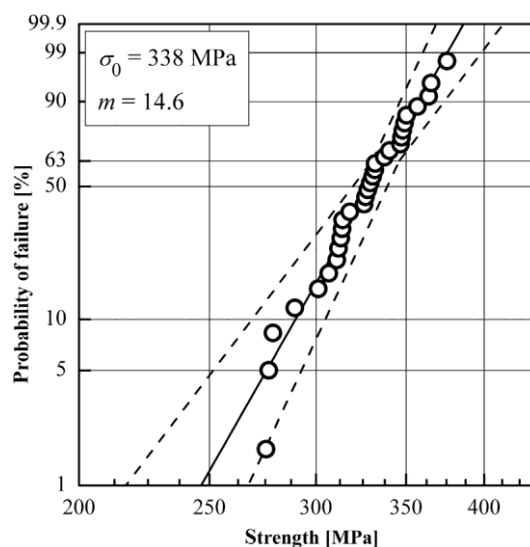


Рис. 4. Діаграма Вейбулла, що відображає залежність кумулятивної ймовірності руйнування від міцності (пряма лінія – розподіл Вейбулла, пунктирні лінії – межі комбінованих 90% довірчих інтервалів) [13, с. 178]

$d \sim 0,30\mu\text{m}$) під час випробування на 4-точковий вигин, було преведене в [12, сс. 3-6]. Систематичний аналіз за допомогою статистики Вейбулла показав, що середнє значення міцності на вигин та модуль Вейбулла змінюються від 960 МПа та $m=10.9$ для синтезованого порошку, а при 100 і 200 годинах старіння в парах води в автоклаві за $T=131^\circ\text{C}$, становлять 916 МПа ($m=19,5$) і 860 МПа ($m=19.8$) відповідно. Збільшення модуля Вейбулла m пояснюється зміною характеру походження руйнування – від природних дефектів вихідного матеріалу до початкових дефектів у зруйнованому поверхневому шарі, який під навантаженням розширюється на глибину, що дорівнює його товщині.

Діаграма Вейбулла в разі одноосового й одно-рідного поля напружень для глиноземистої кераміки (рис. 4) показує, що навіть за дуже малої напруги зберігається певний ризик руйнування

матеріалу. Для $\sigma/\sigma_0 \ll 1$ справедливе твердження, що $F \propto \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m$ [13, с. 179].

Висновки. Статистика Вейбулла є ефективним інструментом для опису статистичної поведінки механічних властивостей керамічних матеріалів, зокрема кераміки на основі діоксиду цирконію. Використання статистики Вейбулла дає змогу проводити статистичний аналіз даних, отриманих під час випробувань керамічних матеріалів на міцність, відповідно до вимог міжнародних стандартів. Параметр форми розподілу Вейбулла (m) є мірою однорідності матеріалу. Для кераміки на основі діоксиду цирконію модуль Вейбулла зазвичай перебуває в діапазоні $10 < m < 20$. Статистика Вейбулла може бути застосована для оцінювання впливу різних чинників, таких як склад, обробка та умови експлуатації, на механічні властивості керамічних матеріалів.

Список літератури:

1. Deng B., Jiang D. Determination of the Weibull parameters from the mean value and the coefficient of variation of the measured strength for brittle ceramics. *Journal of Advanced Ceramics*. 2017. № 6(2). Pp. 149–156. <https://doi.org/10.1007/s40145-017-0227-3>
2. Davies I.J. Unbiased estimation of Weibull modulus using linear least squares analysis—A systematic approach. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017. № 37(1). Pp. 369–380. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.07.008>
3. Bermejo R., Supancic P., Danzer R. Influence of measurement uncertainties on the determination of the Weibull distribution. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012. № (32). Pp. 251–255. [10.1016/j.jeurceramsoc.2011.09.008](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.09.008)

4. Wu D., Jiang H. Comment on «A new probability index for estimating Weibull modulus for ceramics with the last-square method». *Journal of Materials Science Letters*. 2003. № (22). Pp. 1745–1746. <https://doi.org/10.1023/B%3AJMSL.0000005410.31979.BE>
5. Gong J. A simple method for determining the Weibull estimator. *Journal of Materials Science Letters*. 1997. №(16). Pp. 875–876. <https://doi.org/10.1023/A:1018515516659>
6. Gong H., Li Y. Relationship between the estimated Weibull modulus and the coefficient of variation of the measured fracture strength for ceramics. *Journal of the American Ceramics Society*. 1999. № 82(2). Pp. 449–452 <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.1999.tb20084.x>
7. Breviary Technical Ceramics. 4th ed. Verband d Keramischen Industrie e V Verlag Hans Fahner GmbH & Co. KG, 2004. 215 p.
8. EN ISO 20501:2022. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Weibull statistics for strength data (ISO 20501:2019). Effective Date from 28.12. 2022. <https://surl.li/zmwwmb>
9. Stawarczyk B., Özcan M., Trottman A., Hämmerle C.H.F., Roos M. Evaluation of flexural strength of hiped and presintered zirconia using different estimation methods of Weibull statistics. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2022. № 10. Pp. 227–234. doi:10.1016/j.jmbbm.2012.01.020
10. Quinn J. B.; Quinn G. D. A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. *Dental Materials*. 2010. № 26(2) Pp. 135–147. doi:10.1016/j.dental.2009.09.006
11. ASTM C1239-13. Standard practice for reporting strength data and estimating Weibull distribution parameters for advanced ceramics. West Conshohocken, PA, USA: ASTM Int.; 2013. <https://surl.li/lloep1>
12. Marro F., Alvaro M., Lamghari M., Marcos G. Weibull characterization of the flexural strength of hydrothermally degraded 3Y-TZP zirconia. *Ceramics International*. 2014. № 40(8B). Pp. 12777–12782. 10.1016/j.ceramint.2014.04.131
13. Lube T., Danzer R. Mechanical properties and reliability of advanced ceramics. *Advanced Ceramics for Dentistry*. 2014. Pp. 173–199. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394619-5.00009-2>

Morozova O.M., Fedorenko O.Yu., Hevorkian E.S. APPLICATION OF WEIBULL STATISTICS IN MECHANICAL PROPERTIES DESCRIPTION OF CERAMIC MATERIALS

The article is devoted to the study of the use of Weibull statistics for the modelling of mechanical characteristics of oxide ceramics, in particular ceramics based on zirconium dioxide (ZrO₂). Oxide ceramics is one of the most widely used ceramic systems in modern industry. In particular, ZrO₂ ceramics have high strength, wear resistance, chemical resistance and biocompatibility, making them an ideal material for use in various industries. For instance, the implementation of ceramic materials in the field of biomedical engineering and bone implants has shown that the mechanical properties and reliability of ceramic systems are the most important factors governing the reliability of materials. ZrO₂ ceramics are known for their high strength, wear resistance, chemical resistance, and biocompatibility, making them suitable for applications in a variety of fields, including biomedical engineering and bone implants. However, its main limitations are related to low impact strength and crack resistance. For ceramic materials subjected to mechanical stress, the assessment of structural homogeneity and reproducibility of mechanical properties is particularly important. To overcome these problems, Weibull statistical analysis is used, which describes the probability of failure of ceramic materials under various loads. The Weibull statistical analysis is an effective method for estimating the reliability of ceramic materials and can also be used to analyse the statistics of the material's life cycle. The paper analyses the Weibull model and methods for estimating its parameters, in particular the least squares, maximum likelihood and method of moments methods. The paper presents the results of studies of the bending strength of zirconium dioxide samples and the effect of defects and temperature on their strength. The studies show that Weibull statistics is an effective tool for assessing the homogeneity and reliability of ceramic materials.

Key words: ceramic materials, reliability, Weibull model, oxide ceramics, quality.

УДК 620.3: 66.061.34 + 543.9
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/31>

Мощенко А.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воробйова В.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЛИБОКО ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ НА ОСНОВІ ХОЛІН ХЛОРИДУ

За останні роки у зв'язку з розвитком хімії розчинників, зокрема хімії неводних розчинів, багато новітніх розчинників знаходять широке застосування в хімічній технології та інженерії. Розробка нових «зелених» розчинників є одним із ключових предметів хімічної інженерії в реаліях ресурсозберігаючих технологій. У зв'язку із цим, іонні рідини (ІР) і глибокі евтектичні розчинники (ГЕР) привернули велику увагу як заміна технологічних органічних розчинників. Для створення нових розчинників необхідно вирішити одну з основних задач – прогнозування і обґрунтування вибору компонентів для їхнього синтезу, що надалі забезпечить їх ефективність використання, стабільність при зберіганні і екологічну безпеку. Проведено підбір сполук донорів для ГЕР на основі холін хлориду, синтез та здійснена їх характеристика, зокрема визначено їх густина, в'язкість, рН, а також вплив води на фізико-хімічні властивості. Встановлено, що ГЕР мають високу стабільність. У статті досліджено фізико-хімічні властивості ГЕР на основі холін хлориду з метою їх використання в різних сферах хімічних технологій. Результати досліджень демонструють, що комбінації холін хлориду як акцептора водневого зв'язку з різними донорами водневого зв'язку (лимонна, молочна, яблучна, гліколева кислота; гліцерин, етиленгліколь, гліцин, пролін та ін.) можуть бути ефективно використані для розробки стабільних та ефективних ГЕР, які можна використати в різних галузях хімічної технології та фармації. Варіація донора при синтезі ГЕР суттєво впливає на фізико-хімічні властивості отриманих розчинників. Показано, що рН ГЕР зменшується у порядку використаного донора: сахароза-сорбіт-етиленгліколь-гліцерин-гліцин-пролін-молочна кислота-яблучна-гліколева-лимонна. Найбільше збільшення рН у ГЕР з сахарозою – 7,12 при 20°C, при збільшенні температури до 60°C рН зменшується до 6,66. При введенні води спостерігається зменшення рН. Встановлено, що водневий зв'язок між компонентами сприяє зменшенню міжмолекулярного простору, що підвищує густина ГЕР. На густина ГЕР також може впливати молярне співвідношення акцепторів і донорів водневих зв'язків. Найбільша густина спостерігається у ГЕР на основі холін хлориду і D-сорбіту/сахарози. При збільшенні температури значення рН і густини зменшуються лінійно. Більш в'язкими є ГЕР на основі холін хлориду з проліном/гліцерином та лимонною кислотою. Кислоти з вищою молекулярною масою (лимонна кислота) утворюють щільнішу структуру, що збільшує її в'язкість. Зі збільшенням температури в'язкість зменшується експоненційно. Наявність води впливає на фізичні властивості ГЕР, змінюючи їх суміш з бінарної на потрійну та суттєво впливає на фізико-хімічні властивості зменшуючи густина, в'язкість та рН тим самим розширюючи функціональне застосування.

Ключові слова: глибокі евтектичні розчинники, фізико-хімічні властивості, холін хлорид, пролін, водневий зв'язок, молекулярна структура, розчинник.

Постановка проблеми. В даний час зелені технології є одним з ключових питань в хімії, оскільки вони спрямовані на збереження навколишнього середовища та зменшення можливого негативного впливу на здоров'я людини. «Зелена» хімічна технологія зменшує використання небезпечних середовищ, пропонуючи нові екологічно прийнятні методи розчинення шляхом контролю фізичних властивостей середовищ і розробки нових екологічно чистих розчинників. Останнім

часом, з метою розробки екологічно чистих розчинників, іонні рідини (ІР) привертають до себе все більше уваги, оскільки вони мають знижений тиск пари і можуть бути адаптовані щодо полярності та селективності для різного застосування. Іншим типом розчинника з фізичними властивостями та фазовою поведінкою, подібними до ІР, є глибокі евтектичні розчинники (ГЕР) [1]. Ці розчинники являють собою суміші сполук, які мають набагато нижчу температуру плавлення, ніж

будь-який з його окремих компонентів, головним чином через утворення міжмолекулярних водневих зв'язків. Деякі особливості ГЕР роблять їх більш перспективними перед ІР, оскільки їх легше синтезувати та вони мають нижчу варність. ГЕР можна розглядати як один із значущих зелених розчинників з унікальними фізичними властивостями. Фізичні властивості ГЕР, такі як густина, в'язкість, поверхневий натяг, провідність і т.д., визначають їх застосування. ГЕР мають характеристики, які зробили їх кращими перед традиційними розчинниками, такими як дешевизна, безпека, низька токсичність, нелеткість, термостабільність, негорючість, стійкість і здатність до біологічного розкладання [2, 3].

Фізико-хімічні характеристики ГЕР залежать від природи акцепторів і донорів водневих зв'язків, які утворюють евтектичні суміші. Тому їх фізико-хімічні характеристики можна регулювати, змінюючи їх молярне співвідношення та розмір аніонів [4]. Отже, фізико-хімічні властивості ГЕР відіграють великий вплив на галузь використання. Тому дослідження поведінки зміни фізико-хімічних властивостей ГЕР в залежності від їх складу є актуальним для правильного підбору складових та подальшого цільового використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для хімічної технології та інженерії НЕР III типу є найбільш використовуваними. Евтектика III типу, утворена з донорів хлориду холіну та донорів водневих зв'язків [5, 6]. Ці рідини прості в приготуванні, є біорозкладними і дешевими в приготуванні. Широкий діапазон доступних донорів водневих зв'язків означає, що цей клас НЕР особливо легко піддається адаптації. Варіювання компонентів ГЕР, які використовуються як донори водневого зв'язку, впливає на фізико-хімічні властивості.

Постановка завдання. Важливою особливістю ГЕР є їхня здатність змінювати свої фізико-хімічні властивості залежно від вибору компонентів та їхнього співвідношення, що забезпечує широкий потенціал для досліджень і технологічних розробок. Однак для ефективного використання ГЕР у конкретних процесах необхідно глибше розуміння залежності їхніх фізико-хімічних властивостей від природи та співвідношення складових компонентів.

Метою цієї роботи є встановлення і систематизація залежності фізико-хімічних властивостей глибоких евтектичних розчинників від донора водневого зв'язку.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень. У таблиці 1 представлені компоненти досліджуваних ГЕР. Процес синтезу був наступний: складові зважували у молярному співвідношенні, яке наведене в таблиці 1, компоненти поміщають у ємність з мішалкою та кришкою та нагрівають на водяній бані з перемішуванням до отримання прозорої рідини. Після отримання рідкої суміші, охолоджували до кімнатної температури. Для визначення рН концентрація ГЕР складала 0,5 моль/л. Свіжо-приготовані розчини термостатували при температурі 20°C протягом 30 хв. Вимірювали при цій температурі, потім поступово нагрівали до 60°C і вимірювали рН за допомогою Mettler Toledo S220.

Густину ГЕР вимірювали при температурі, в діапазоні від 20°C до 60°C, з кроком 10) за допомогою денситометру Mettler Toledo DM40.

В'язкість ГЕР вимірювали за допомогою Anton Paar Rheolab Qc. Температуру контролювали за допомогою зовнішньої циркуляції води типу Techne-Tempette TE-8A.

Отримані експериментальні результати.

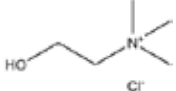
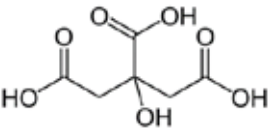
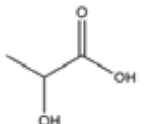
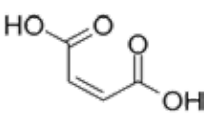
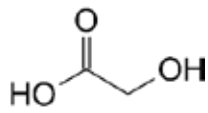
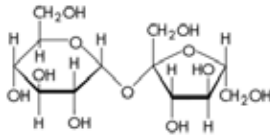
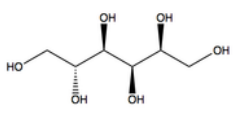
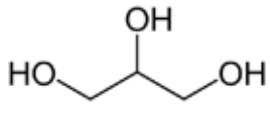
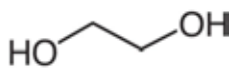
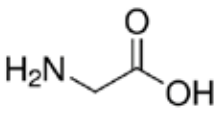
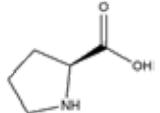
ГЕР були приготовані з використанням різних донорів водневих зв'язків з фіксованим акцептором водневих зв'язків – холін хлориду. Значення рН знижуються з ростом температури для всіх ГЕР. Графічна оцінка залежності рН від температури представлена рис. 1.

рН отриманих ПРГЕР вимірювали за допомогою Mettler Toledo S220. РН-метр відкалібрували із застосуванням стандартних буферів рН.

У відсутності води ГЕР, приготовані з використанням етиленгліколя і гліцерину продемонстрували високі значення рН. Ці значення рН, пояснюються тим, що хлоридний аніон (Cl^-), який може взаємодіяти з гідроксильними групами етиленгліколю/гліцерину. Ці взаємодії призводять до зміщення рівноваги протонів і збільшення концентрації H^+ у системі. ГЕР утворені органічними компонентами мають кисле середовище, оскільки органічні кислоти є джерелом протонів. рН залежить від типу кислоти, лимонна кислота є поліпротонною кислотою, тому її здатність знижувати рН сильніша. Гліколева кислота є невеликою молекулою, тому забезпечує більшу кількість протонів на одиницю ваги, тому є сильнішою, ніж яблучна. Молочна кислота має слабку кислотність через чаткову дисоціацію. Гліцин та пролін – амінокислоти, які є слабкими біполярними молекулами, в залежності від середовища може існувати в різних формах. З холін хлоридом гліцин утво-

Таблиця 1

Системи НЕР

Абри- віатура	Акцептор водневого зв'язку	Структурна формула	Донор водневого зв'язку	Структурна формула	Співвідно- шення сполук
ГЕР-1	Холін Хлорид		Лимонна кислота		1:2
ГЕР-2	Холін Хлорид		Молочна кислота		1:1
ГЕР-3	Холін Хлорид		Яблучна кислота		1:2
ГЕР-4	Холін Хлорид		Гліколева кислота		1:3
ГЕР-5	Холін Хлорид		Сахароза		1:2
ГЕР-6	Холін Хлорид		D-сорбіт		1:2
ГЕР-7	Холін хлорид		Гліцерин		1:2
ГЕР-8	Холін хлорид		Етиленгліколь		1:1
ГЕР-9	Холін хлорид		Гліцин		1:2
ГЕР-10	Холін хлорид		Пролін		1:2

рює водневі зв'язки і деякою мірою може дисоціювати, впливаючи на кислотність ГЕР. В ГЕР з D-сорбітом та сахарозою Cl^- є сильним акцептором водневих зв'язків, що стабілізує систему і сприяє пригніченню дисоціації H^+ із гідроксильних груп сорбіт, тому рН ГЕР є нейтрально-слабокисле. Навіть невелика кількість води посилює

дисоціацію кислот і знижує рН. Густина ГЕР переважно вища, ніж у води. Густина ГЕР залежить від молекулярної організації та упаковки молекул. Для досліджуваних ГЕР виміряна густина наведена на Рис. 2.

Взаємодія між хлорид-іонами (Cl^-) холінхлориду та гідроксильними групами сорбіту створює

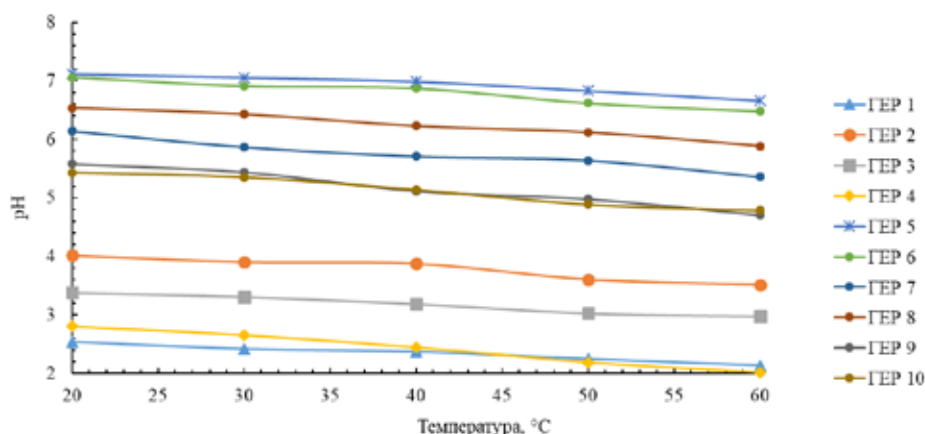


Рис. 1. Залежність рН ГЕР від температури

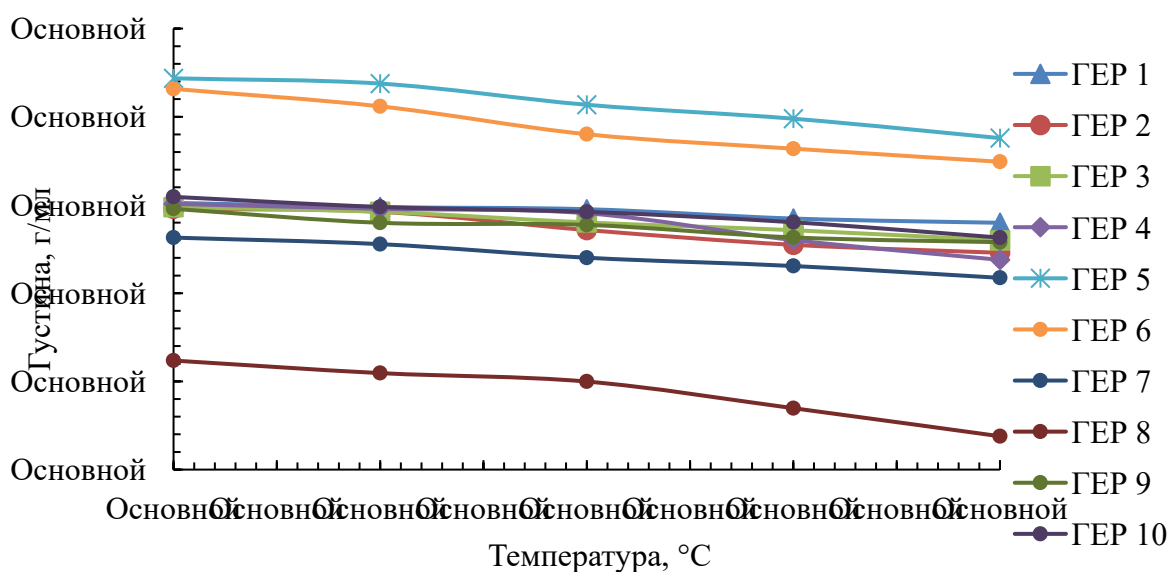


Рис. 2. Залежність густини ГЕР від температури

щільну тривимірну структуру. Водневі зв'язки між компонентами сприяють зменшенню міжмолекулярного простору, що підвищує густину ГЕР.

Взаємодія холін хлориду з сахарозою через водневі зв'язки та іон-дипольні взаємодії, які сприяють щільному упаковуванню молекул. Сахароза – полярна молекула з численними гідроксильними групами (-ОН), які здатні утворювати сильні водневі зв'язки, також утворює розгалужену структуру взаємодій із хлорид-іоном (Cl^-) і гідроксильними групами холінхлориду, підвищуючи густину ГЕР.

Лимонна кислота є поліпротонною з трьома карбоксильними групами (-COOH) і однією гідроксильною групою (-ОН), які виступають донорами водневих зв'язків, завдяки високій полярності, утворює багато водневих зв'язків, які сприяють високій густині.

Молочна кислота та яблучна кислота, як донор водневих зв'язків, взаємодіє з холінхлоридом, створюючи стабільну рідку фазу з високою густиною. У ГЕР часткова іонізація яблучної кислоти призводить до утворення малат-іонів, які беруть участь у взаємодіях із хлорид-іонами. Це додає іонно-дипольних взаємодій, які підвищують густину. Гліколевова кислота має характерну взаємодію близьку до яблучної кислоти, утворюючи гліколат-іони. В амінокислотах (пролін та гліцин) густина пояснюється відповідно до цукрів. З проведених досліджень, можна зробити наступні висновки, що чим більша кількість гідроксильних груп у системі, тим більше можливостей для компактного упакування молекул, що підвищує густину. Чим більше можливостей для водневих зв'язків, тим щільніше компоненти упаковуються, що підвищує густину. Чим більша кількість доно-

рів і акцепторів водневих зв'язків у системі, тим вища густина.

На густину ГЕР також може впливати молярне співвідношення акцепторів і донорів водневих зв'язків [7]. Крім того, густина ГЕР зменшується при температурі. Наприклад, щільність упаковки молекул зменшується зі збільшенням температури через збільшення іонного руху та вільного об'єму в рідкому ГЕР. Відповідно до теорії Хоула, теплова енергія може генерувати флуктуації локальної густини, що призводить до збільшення простору в рідкій системі ГЕР [8]. В'язкість є ще однією важливою фізичною властивістю ГЕР. Властивість транспортування пов'язана з в'язкістю ГЕР і вказує на їх провідність [9]. Більшість ГЕР були визнані в'язкою рідиною при кімнатній температурі, в'язкість досліджуваних ГЕР наведена на Рис. 3. Існування розгалуженої мережі водневих зв'язків з іншими взаємодіями, такими як ван-дер-ваальсові та електростатичні сили між донором і акцептором водневого зв'язку компонентів ГЕР призводить до високої в'язкості та нижчої іонної рухливості в малому об'ємі порожнечі в рідких ГЕР. На в'язкість ГЕР впливає хімічна природа молярне співвідношення акцепторів і донорів водневих зв'язків, температура, молярна маса та молярне співвідношення [10].

Молекули гліцину та проліну утворюють міжмолекулярні водневі зв'язки між своїми функціональними групами. Велика кількість водневих зв'язків призводить до підвищення в'язкості через утворення щільної та впорядкованої мережі взаємодій. Іонізація гліцину підсилює електростатичні взаємодії та збільшує в'язкість системи. Для

проліну також важливу роль відіграє утворення цвітеріонів, які підсилюють електростатичні взаємодії.

Лимонна кислота створює ГЕР із найвищою в'язкістю серед цих кислот. Утворює щільну мережу водневих зв'язків, що значно збільшує в'язкість ГЕР. Молочна кислота забезпечує утворення менш щільної молекулярної мережі порівняно з лимонною кислотою. Гліколева кислота має, так як і молочна, одну карбоксильну і одну гідроксильну групу, але меншу молекулярну масу, ніж молочна кислота, тому в'язкість DES є нижчою. Яблучна створює більш щільну молекулярну структуру, ніж молочна і гліколева кислоти, але менш щільну, ніж лимонна кислота. Кислоти з вищою молекулярною масою (наприклад, лимонна) утворюють щільнішу структуру, що збільшує в'язкість. Легші кислоти, такі як гліколева, забезпечують нижчу в'язкість через меншу здатність до утворення складної молекулярної структури.

В'язкість ГЕР із сорбітом є нижчою, ніж із сахарозою. Утворює більше водневих зв'язків, ніж сорбіт, через наявність великої кількості функціональних груп. Сорбіт – лінійна молекула з шістьма гідроксильними групами, тому створює менш щільну молекулярну структуру, що знижує в'язкість. Сахароза – розгалужена молекула з більшою кількістю функціональних груп. Формує жорсткішу структуру, що збільшує в'язкість. Гліцерин має більшу кількість гідроксильних груп ніж у етиленгліколя, , також більшу молекулярну масу, тому ГЕР з гліцерином, буде мати більше значення в'язкості. Температура має значний вплив

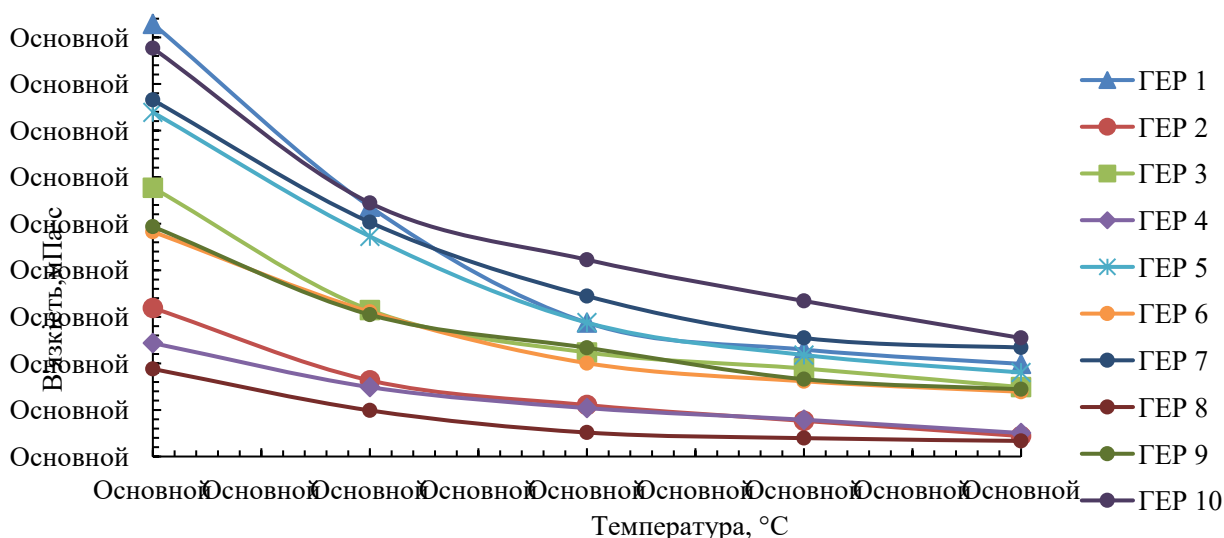


Рис. 3. Залежність в'язкості ГЕР від температури

на в'язкість ГЕР, руйнуючи мережу водневих зв'язків між донором і акцептором, що призводить до зниження в'язкості ГЕР із підвищенням температури. У зелених технологіях ГЕР з низькою в'язкістю є більш зацікавленими, і вони можуть бути розроблені з використанням малого розміру донорів і катіонів на основі теорії дірок [11]. Більшість ГЕР визнані гігроскопічними сумішами, і їх навряд чи можна повністю висушити. Подвійні властивості води як акцептора і донора водневих зв'язків слід враховувати під час поглинання та додавання води до глибоких евтектичних розчинників. Вода може взаємодіяти як з донорами, так і акцепторами зв'язків ГЕР, а потім руйнувати взаємодію водневих зв'язків між органічною сіллю та донором водневого зв'язку шляхом утворення багатоводневого зв'язку з донором водневого зв'язку [12]. Поглинальна здатність і швидкість поглинання молекул води з повітря збільшується за рахунок збільшення довжини ланцюга ГЕР карбонової кислоти [13].

Вміст води або додавання води до ГЕР впливає на їхні фізико-хімічні властивості та біосумісність. Збільшення вмісту води в сумішах ГЕР знижує їх точку плавлення, щільність і в'язкість шляхом розриву водневих зв'язків між кожним компонентом ГЕР і збільшення їх іонної рухливості. Після проведення випробовування визначивши фізико-хімічні властивості в діапазоні збільшення температури. Додатково проведено дослідження додавши до приготованих ГЕР,

у масовому співвідношенні 1:1 до вмісту холін хлориду. Було виявлено, що при додаванні води, значення густини в середньому зменшилися на 18,4 %, в'язкість зменшилась на 24,1 %, рН – на 12 %.

Висновки. Визначено фізико-хімічні властивості ГЕР на основі холін хлориду. Їх унікальні властивості обґрунтовують доцільність дослідження їхньої поведінки. ГЕР із D-сорбітолом та сахарозою, демонструють високий рН, тоді як інші ГЕР мають кисле середовище, оскільки органічні кислоти є джерелом протонів, а рН залежить від типу кислоти. Взаємодія між Cl^- і гідроксильними групами сорбіту створює щільну тривимірну структуру, а водневі зв'язки між компонентами зменшують міжмолекулярний простір і збільшують густину. Молярне співвідношення акцепторів і донорів також впливає на густину, яка максимальна для ГЕР із холін хлоридом і D-сорбітом/сахарозою. Зі зростанням температури густина й рН лінійно зменшуються. Найвища в'язкість спостерігається у ГЕР на основі холін хлориду з проліном, гліцерином або лимонною кислотою. Кислоти з більшою молекулярною масою, наприклад лимонна, формують щільніші структури, що підвищує в'язкість. Підвищення температури руйнує водневі зв'язки між донором і акцептором, спричиняючи експоненційне зниження в'язкості. Наявність води змінює властивості ГЕР, перетворюючи їх із бінарних на потрійні системи, що знижує густину, в'язкість і рН.

Список літератури:

1. El Abedin S. Zein, et al. Ionic liquids as green electrolytes for the electrodeposition of nanomaterials. *Green Chemistry*. 2007. № 9(6). С. 549–553.
2. Liu Y., Friesen J. B., McAlpine J. B., Lankin D. C., Chen S. N., Pauli G. F. Natural Deep Eutectic Solvents: Properties, Applications, and Perspectives. *Journal of Natural Products*. 2018. № 81. С. 679–690.
3. Mbous Y. P., Hayyan M., Hayyan A., Wong W. F., Hashim M. A., Looi C. Y. Applications of deep eutectic solvents in biotechnology and bioengineering: Promises and challenges. *Biotechnology Advances*. 2017. № 35. С. 105–134.
4. Omar K. A., Sadeghi R. Novel deep eutectic solvents based on pyrogallol: synthesis and characterizations. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2021. № 66(5). С. 2088–2095.
5. Gereniu C. R. N., Saravana P. S., Chun B. S. Recovery of carrageenan from Solomon Islands red seaweed using ionic liquid-assisted subcritical water extraction. *Separation and Purification Technology*. 2018. № 196. С. 309–317.
6. Bakirtzi C., Triantafyllidou K., Makris D. P. Novel lactic acid-based natural deep eutectic solvents: Efficiency in the ultrasound-assisted extraction of antioxidant polyphenols from common native Greek medicinal plants. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. 2016. № 3. С. 120–127.
7. García G., Aparicio S., Ullah R., Atilhan M. Deep eutectic solvents: physicochemical properties and gas separation applications. *Energy & Fuels*. 2015. № 29(4). С. 2616–2644.
8. Yadav A., Pandey S. Densities and viscosities of (choline chloride + urea) deep eutectic solvent and its aqueous mixtures in the temperature range 293.15 K to 363.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2014. № 59(7). С. 2221–2229.

9. Sun T., Teja A. S. Density, viscosity, and thermal conductivity of aqueous ethylene, diethylene, and triethylene glycol mixtures between 290 K and 450 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2003. № 48(1). C. 198–202.
10. Zhang Q., Vigier K. D. O., Royer S., Jérôme F. Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications. *Chemical Society Reviews*. 2012. № 41(21). C. 7108–7146.
11. Abbott A. P., Capper G., Gray S. Design of improved deep eutectic solvents using hole theory. *ChemPhysChem*. 2006. № 7(4). C. 803–806.
12. Shah D., Mjalli F. S. Effect of water on the thermo-physical properties of Reline: An experimental and molecular simulation based approach. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2014. № 16(43). C. 23900–23907.
13. Chen Y., Yu D., Chen W., Fu L., Mu T. Water absorption by deep eutectic solvents. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019. № 21(5). C. 2601–2610.

Moshchenko A.S., Vorobiova V.I. SKIBA RESEARCH OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF DEEP-EUTETIC SOLVENTS BASED ON CHOLINE CHLORIDE

Development of new green solvents is one of the key subjects of environmental chemistry. Thus, ionic liquids (ILs) and deep eutectic solvents (DERs) have attracted much attention as a replacement for current toxic organic solvents and are now used in many chemical processes. In order to characterize deep eutectic solvents, the interaction between molecules was investigated by physicochemical characteristics such as density, viscosity, pH, and the effect of water on physical properties. All tested DESs demonstrate clear hydrogen bonds between components.

Based on the results, DESs are potential green solvents at room temperature in various branches of chemistry. The article investigates the physicochemical properties of DERs based on choline chloride with the aim of their use in various fields of chemical technology. The work provides a comparative analysis of the physicochemical properties of DERs of type III in pure form and with the addition of water. The results of the studies demonstrate that combinations of choline chloride as a hydrogen bond acceptor with various hydrogen bond donors (citric, lactic, malic, glycolic acid; glycerol, ethylene glycol, glycine, proline, etc.) can be effectively used to develop stable and effective GERS that can be used in various branches of chemical technology and pharmacy. The variation of the donor in the synthesis of DES significantly affects the physicochemical properties of the obtained solvents. The pH of DES decreases in the order of the donor used: sucrose-sorbitol-ethylene glycol-glycerol-glycine-proline-lactic acid-malic-glycolic-citric. The greatest increase in pH in DESs with sucrose is 7.12 at 20°C, with an increase in temperature to 60°C the pH decreases to 6.66. A decrease in pH is observed when water is introduced. Hydrogen bonds between components contribute to the reduction of intermolecular space, which increases the density of DES. The density of DES can also be affected by the molar ratio of hydrogen bond acceptors and donors. The highest density is observed in DES based on choline chloride and D-sorbitol/sucrose. With increasing temperature, the pH and density values decrease linearly. The highest viscosity is observed in DES based on choline chloride with proline/glycerol and citric acid. Acids with a higher molecular weight (e.g. citric) form a denser structure, which increases the viscosity. With increasing temperature, the viscosity decreases exponentially. In addition, the presence of water, even in small amounts in DES, affects the physical properties of DES, changing their mixture from binary to ternary and significantly affects the physicochemical properties by reducing the density, viscosity and pH.

Key words: deep eutectic solvents, physicochemical properties, choline chloride, proline, hydrogen bonds, molecular structure, solvents.

Сгадов С.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

АЛГОРИТМ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН СКЛАДУ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТВЕРДИХ ТІЛ ПІД ВПЛИВОМ ГАЗОВОЇ ФАЗИ, АКТИВОВАНОЇ ЗОВНІШНІМ ДЖЕРЕЛОМ ЗБУДЖЕННЯ

Стаття присвячена розробці математичної моделі та алгоритму, що описує зміни складу приповерхневих шарів твердого тіла під дією активованої газової фази. Для моделювання обрана протяжна одновимірна гетерогенна система, що включає газову суміш, що взаємодіє з поверхнею кристалічного зразка; зону впливу зовнішнього джерела збудження; газову фазу з можливими випаданнями конденсованих фаз індивідуальних речовин, наприклад, на пасивних стінках реактора, в якому може перебувати система, що моделюється; приповерхневу область твердого тіла, хімічний склад якої зазнає змін під дією активованої газової фази; область об'єму твердого тіла, яку можна розглядати як жорсткий розчин, параметри якого можуть змінюватись під дією змін у газовій фазі. Модель ґрунтується на методах рівноважної термодинаміки та газової кінетики, що дозволяє враховувати термодинамічні параметри, отримані на основі незалежних експериментальних даних. Запропонована модель дає можливість оцінити рівноважний склад елементарних осередків та його зміну під час активації газової фази. Система розбивається на елементарні клітини, у яких термодинамічні параметри однорідні. З'ясовано, що відхилення від рівноваги в цих клітинах дотримуються поправок до рівноважних хімічних потенціалів речовин, що дозволяє використовувати принцип мінімуму вільної енергії Гіббса для розрахунку розподілу речовин як у газовій фазі, так і в твердому тілі. Для цього використовується принцип мікрозворотності Онзагера, згідно з яким розмір елементарної клітини в газовій фазі повинен бути ніяк не менше довжини вільного пробігу, а в твердому тілі – більше довжини міжатомних зв'язків. У статті наведено приклад переходу для граничних умов диференціальних рівнянь масопереносу до рівнянь, які описують процес передачі зміщення хімічного потенціалу. Також наведено алгоритм для розрахунку стаціонарного стану при впливі зовнішнього збудження.

Ключові слова: термодинаміка, рівноважна концентрація, масоперенос, енергія Гіббса, гетерофазна система.

Постановка проблеми. Розвиток мікроелектроніки є досить перспективним напрямком. Сучасні технології мікроелектроніки містять у собі цілий ряд хімікофізичних процесів, у результаті яких створюються нерівновагі твердотільні структури. Моделювання процесів одержання твердотільних структур становить інтерес не тільки для розвитку радіоелектронної промисловості, але для фундаментальних досліджень в області фізики й хімії поверхні. При цьому об'єктом теоретичного аналізу в технології є співвідношення між вихідним набором речовин, принципами синтезу, структурою й функціями готових виробів; іншими словами – це вибір оптимального (або єдиного) шляхи синтезу й установлення його принципів меж. Виробництво СБИС для сучасних засобів обробки інформації може служити найбільш яскравим прикладом цьому. Багато процесів твердотільного синтезу успадковуються із класичної металургії, інші розроблені знову. У цілому їхній арсенал охоплює

майже всі досягнення фізики й хімії твердого тіла, рідин газів, плазми й навіть фізики елементарних часток. Газофазні процеси, послужили основою твердотільних технологій. Інерційність і дифузність газових потоків є факторами, що лімітують при синтезі структур вищого рівня складності. Поряд із цим виникають два сильні побічні ефекти: автолегування й порушення однорідності по сполуці й морфології. У зв'язку із зазначеними особливостями газофазних методів ведуться інтенсивні дослідження з метою їх заміни молекулярно-променевими, іонно-плазмовими й іонно-променевими процесами, що, однак, не означає, що газофазні процеси вичерпали свої можливості. Таким чином, дослідження в області газофазних і, особливо, плазмохімічних технологій є перспективними напрямками в теорії мікроелектронної технології. А оскільки процеси модифікації поверхні твердого тіла відбуваються під впливом процесів у навколишньому їхньому об'ємі, тобто іншими словами, у присутності джерела

відхилення від хімічної рівноваги, то процеси на поверхні повинні досліджуватися нерозривно від процесів в об'ємі всієї системи, тобто в цілому. Тому метою даної роботи стала розробка теоретичного опису взаємодії поверхні зразка з об'ємом реактора з метою одержати математичну модель, що описує вплив зовнішньої активізації речовин на розподіл і сполука речовин у замкненій хімічній системі типу газ – тверде тіло. Типовим прикладом такої системи може служити взаємодія атомизованого водню з поверхнею напівпровідника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Активізація газової фази в електричному розряді, полум'ях, при фотодії та інших знаходить широке застосування в технологіях, пов'язаних з очищенням, окисдуванням, нітруванням поверхні твердих тіл, їх травленням, осадженням на поверхні різних покриттів [1-6]. Такі процеси з метою моделювання зазвичай описуються методами хімічної кінетики [7-11]. При цьому отримують системи диференціальних рівнянь (найчастіше нелінійних і неоднорідних), що містять параметри, які емпірично підбираються з умови узгодження результатів моделювання з експериментальними даними для кожного конкретного випадку. Остання обставина не дозволяє використовувати такі моделі для прогнозування зміни складу систем, що вивчаються, оцінки режимів ведення розроблюваних технологічних процесів.

Поруч із методами хімічної кінетики, широке застосування вивчення складу систем знаходять методи рівноважної термодинаміки [12-16]. Такі методи використовують термодинамічні параметри, отримані на основі незалежних експериментальних даних, надійно встановлені і добре табульовані.

Гетерогенні системи, до яких належать розглянуті системи, у принципі неоднорідні, а тому нерівноважні. Термодинамічний моделювання систем, у яких суттєво як розташування меж фаз, і розподіл речовин за обсягом.

Так як більшість вищезгаданих процесів ведуться в стаціонарних режимах, то у даною статті застосовані термодинамічні методи для опису процесів взаємодії активованих газів з поверхнею твердого тіла. При цьому клас аналізованих систем був обмежений оборотними системами, для яких характерна незмінність складу при стаціонарному веденні процесу і рухливість за зміною зовнішніх параметрів.

Постановка завдання. Метою статті є створення алгоритму для розрахунку розподілу речовини у газовій фазі під дією зовнішнього джерела

впливу; прогнозування змін складу приповерхневих шарів кристалічного зразка; визначення розподілу розчинених речовин за глибиною зразка. Для моделювання обрана протяжна одновимірна гетерогенна система, яка включає в себе газову суміш, що взаємодіє з поверхнею кристалічного зразка; зону впливу зовнішнього джерела збудження; газову фазу з можливими випадіннями конденсованих фаз індивідуальних речовин, наприклад, на пасивних стінках реактора, в якому може перебувати система, що моделюється; приповерхневу область твердого тіла, хімічний склад якої зазнає змін під дією активованої газової фази; область об'єму твердого тіла, яку можна розглядати як твердий розчин, параметри якого можуть змінюватися під дією змін в газовій фазі.

Виклад основного матеріалу. Області впливу зовнішнього джерела збудження припишемо координатну точку $x = 0$, а поверхні зразка $x = L$. При моделюванні також припускаємо, що в процесах основну роль відіграють електрично нейтральні частинки.

Для подолання вищеописаних труднощів термодинамічного моделювання система розбивається по довжині на M частин таким чином, що в кожній з елементарних клітин термодинамічні характеристики можна вважати однорідними. В основі розбиття повинен також лежати принцип мікрооборотності Онзагера, згідно з яким розмір елементарної клітини в газовій фазі повинен бути ніяк не меншим за довжину вільного пробігу, а в твердому тілі – більше за довжину міжатомних зв'язків.

Кожна з елементарних клітин, в силу принципу локальної рівноваги [13], характеризується набором термодинамічних характеристик, у тому числі вільною енергією Гіббса G , значення якої для рівноважного випадку буде мінімальним. Стаціонарний стан клітини відрізняється від рівноважного тим, що її склад відхиляється від рівноважного під впливом сукупності сторонніх сил (ззовні даної клітини), до яких можна віднести різницю хімічних потенціалів між клітинами, вплив зовнішніх енергетичних полів тощо. Як наслідок цього, змінюється і вільна енергія елементарної клітини. Таке відхилення від рівноваги можна описати введенням понад рівноважну поправку – доданку у вирази для хімічного потенціалу, яка матиме сенс роботи, досконалої зовнішніми силами над клітиною. Стаціонарному стану в цьому випадку також відповідатиме мінімум функціоналу G_m для m -ї комірки з урахуванням цих понад рівноважних поправок.

До обмежень, накладеним умовами матеріального балансу у кожній клітині, належить необхідність враховувати дифузію продуктів реакцій у сусідніх клітинах. Отже, значення концентрацій $n_i(x)$ (тобто кількостей речовин в обсязі клітини) має підкорятися закону безперервності, що описується рівнянням масопереносу. Це означає, що рішення рівняння масопереносу слід шукати на класі функцій $n_i(x)$, що задовольняють мінімуму функціоналу $G(n(x_m))$ для m -ї клітини, що призводить від крайової задачі для концентрацій до крайової задачі для величини, що характеризує відхилення від рівноваги за допомогою встановлення спеціального виду.

Для елементарної клітини, що містить I газоподібних речовин, K індивідуальних твердих фаз і що складаються з атомів сорту J потенціал енергії Гіббса буде мати вигляд [1]:

$$G_m = \sum_{i=1}^I n_{im} \left(c_{im} + \ln \frac{n_{im}}{\sum_{i=1}^I n_{im}} + \phi_{im} \right) + \sum_{k=1}^K n_{km} c_{km}, \quad (1)$$

де n_{im} – кількість i -го компонента газової фази в m -й комірці при дії зовнішнього джерела впливу; n_{km} – кількість k -го речовини конденсованої фази в тій самій клітинці при дії зовнішнього джерела впливу;

$c_{im} = \frac{\Delta_{f,0} H_{im}}{RT} - \frac{\Phi_{im}^*}{R} + \ln p$ – наведена стандартна зміна хімічного потенціалу речовини;

$c_{km} = \frac{\Delta_{f,0} H_{km}}{RT} - \frac{\Phi_{km}^*}{R}$ – те саме для індивідуальних конденсованих фаз;

$\Delta_{f,0} H$, Φ^* , R , p , T – ентальпія сворення в стандартному стані, наведена енергія Гіббса, постійна газова, тиск у газовій фазі і температура, відповідно;

ϕ_{im} – надрівноважна поправка до хімічного потенціалу i -го речовини в m -й комірці, що відображає вплив зовнішнього, щодо даної клітини впливу (у тому числі і з боку сусідніх).

Умову матеріального балансу кожної з клітин виходячи з закону збереження і принципу локального рівноваги можна виразити як:

$$\sum_{i=1}^I a_{ji} n_{im} + \sum_{k=1}^K a_{jk} n_{km} = b_{jm}. \quad (2)$$

де b_{jm} – кількість атомів сорту j в m -му осередку; a_{ji} , a_{jk} – стехіометричні коефіцієнти.

За допомогою методу невизначених множників Лагранжа з (1) і (2) отримуємо M функціоналів для кожної клітини:

$$G_m = \sum_{i=1}^I n_{im} \left(c_{im} + \ln \frac{n_{im}}{\sum_{i=1}^I n_{im}} + \phi_{im} \right) + \sum_{k=1}^K n_{km} c_{km} + \sum_{j=1}^J \lambda_{jm} \left(b_{jm} - \sum_{k=1}^K a_{jk} n_{km} - \sum_{i=1}^I a_{ji} n_{im} \right), \quad (3)$$

де λ_{jm} – коефіцієнти Лагранжа.

Прирівнявши похідні функціоналів (3) до нуля і виключивши змінні приходимо до M систем рівнянь, що описують локальну рівновагу в кожній із клітин:

$$\begin{cases} P_m \sum_{i=1}^I a_{ji} \exp \left(\sum_{j=1}^J \lambda_{jm} a_{ji} - c_{im} - \phi_{im} \right) + \sum_{k=1}^K a_{jk} n_{km} = b_{jm}, & (j=1..J), \\ \sum_{i=1}^I \exp \left(\sum_{j=1}^J \lambda_{jm} a_{ji} - c_{im} - \phi_{im} \right) = 1, \\ \sum_{k=1}^K a_{jk} \lambda_{jm} - c_{ik} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

де P_m – загальна кількість речовини в m -й клітині.

Рішення системи (4) дозволяє визначити хімічний склад (n_{im} , n_{km}) кожної з M елементарних осередків і, відповідно, розподіл речовин уздовж системи, що розглядається.

Слід зазначити, що змінні n_{im} та λ_{im} пов'язані співвідношенням

$$n_{im} = P_m \exp \left(\sum_{j=1}^J \lambda_{jm} a_{ji} - c_{im} - \phi_{im} \right), \quad (5)$$

яке впливає з явного виду похідної $\frac{\partial G_m}{\partial n_{im}}$.

Легко бачити, що im можна виразити через рівноважні кількості I -го речовини в m -й клітині n_{im}^* : $n_{im} = n_{im}^* e^{-\phi_{im}}$.

Даний вираз дає підставу для визначення надрівноважних поправок, наприклад, експериментально визначених значень n_{im} і n_{im}^* :

$$\phi_{im} = -\ln \frac{n_{im}}{n_{im}^*}.$$

Для врахування взаємодії сусідніх клітин рішення системи (4) виду (5) повинні задовольняти рівняння безперервності, що описує види:

$$D_i \frac{\partial^2}{\partial x^2} n_i = F_i(n, x), \quad (7)$$

де $F_i(n, x)$ – враховує взаємодію i -го речовини з межами.

Підставляючи $n(x)$ у вигляді (5) до рівняння (7) отримуємо рівняння для поширення порушення в системі:

$$-\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \phi_i}{\partial x} f_i(x) + g_i(x) = \varpi_i, \quad (8)$$

де

$$f_i(x) = 2(c'_i - \sum_j a_{ji} \lambda'_j - \frac{P'}{P}), \varphi_i|_{x=0} = -\ln \frac{n_i}{n_i^*} n'_i(x=L) = \Pi_i$$

$$g_i(x) = (c'_i)^2 - 2c'_i \sum_j a_{ji} \lambda'_j + \left(\sum_j a_{ji} \lambda'_j \right)^2 +$$

$$+ 2 \frac{P'}{P} \left(c'_i - \sum_j a_{ji} \lambda'_j \right) - c_i'' + \sum_j a_{ji} \lambda_j'' + \frac{P''}{P}. \quad (8a)$$

Величина φ_i враховує вплив граничних умов та енергообмін на межах осередку на хімічну рівновагу. Взагалі, граничні умови для (8) можуть бути отримані з граничних умов для рівняння масопереносу (7) згідно зі схемою:

$$n_i(x_0) = n_i^0 \rightarrow \varphi_i|_{x=0} = -\ln \frac{n_i}{n_i^*}, \quad (9)$$

$$n'_i(x=L) = \Pi_i \rightarrow \varphi'_i|_{x=L} = \sum_j a_{ji} \lambda'_j + \frac{P'}{P} - c'_i - \frac{\Pi_i}{P} \quad (9a)$$

є n_i^* – рівноважна концентрація, Π_i – величина пропорційна потоку i -го речовини при $x = L$.

Величини $\varphi_{im} = \varphi_i(x_m)$ і λ_{jm} взаємозалежні, тому доцільно скористатися методом Зейделя, розділивши процес розв'язання системи (4) і диференціального рівняння (8) підставляючи по черзі отримані значення φ_{im} систему (4), а отримані з неї λ_{jm} коефіцієнти і крайові умови рівняння (8).

Якщо аналізований процес перебуває у стаціонарному стані, можна вимагати виконання принципу детального рівноваги у сенсі сталості кількості атомів у кожному елементарному осередку й у обсязі загалом. З іншого боку, в результаті хімічних реакцій атоми не зникають і не виникають, а відбувається їхнє перегрупування як між речовинами, так і в просторі. А звідси випливає, що якщо система містить J сортів атомів, то для концентрації атомів j -го сорту b_j має виконуватися закон збереження у формі:

$$\nabla^2 b_j = 0, \quad j=1..J. \quad (10)$$

Розв'язання відповідної крайової задачі для рівнянь (10) на сітці різниці є величини b_{jm} входять до системи рівнянь виду (4). Отже, стаціонарний стан системи у випадку описується рішенням системи нелінійних рівнянь (4) і крайових завдань диференціальних рівнянь (8-10).

Отримана вище модель дозволяє описати твердий розчин як суміш ідеальних газів (наближення, яке працює в багатьох випадках, особливо при низьких концентраціях домішок, крім того, неідеальність можна врахувати запровадженням активностей, що досить тривіально в рамках цієї моделі). Тому неважко транслювати опис перенесення в газовій фазі опис розподілу домі-

шок у твердому тілі, розглянувши його також як сукупність елементарних осередків. Для цього необхідно написати умову для узгодження двох частин системи для вирішення різницевої схем диференціальних рівнянь (8) та (10) у газовому середовищі та твердому розчині.

Розглянемо межу поділу фаз. При цьому вважатимемо, що межа розділу фаз проходить по межі між $\sigma+1$ σ клітинами. Клітина $m = \sigma$ повинна відповідати шару товщиною h адсорбованого газу. Наступна клітина ($m=\sigma+1$) відповідає приповерхневому шару твердого тіла завтовшки h_1 . Оскільки обидві фази відрізняються хімічним складом, то на межі коефіцієнти дифузії зазнають стрибка. При цьому, оскільки проникнення дифузанта проходить стадію адсорбції, то для потоків речовини ліворуч і праворуч поверхні для однієї і тієї ж речовини через принцип детальної рівноваги має виконуватися співвідношення:

$$D_- \frac{\partial n}{\partial x} \Big|_- = D_+ \frac{\partial n}{\partial x} \Big|_+, \quad (11)$$

де D_- – D_+ коефіцієнти дифузії для даної речовини в газі і в твердому тілі однієї і тієї ж речовини. Розділивши обидві частини (11) на D_+ та, скориставшись визначенням кількості атомів у комірі b_{jm} , отримуємо співвідношення для приповерхневої ділянки:

$$\frac{\partial b_j}{\partial x} \Big|_+ = \sum_i a_{ji} \frac{D_-}{D_+} \frac{\partial n}{\partial x} \Big|_- . \quad (12)$$

Якщо ввести різницеві оператори Δ_+ і Δ_- , що визначаються як кінцеві різниці

$$\Delta_- y = y_\sigma - y_{\sigma-1}, \quad \Delta_+ y = y_{\sigma+1} - y_\sigma, \quad (13)$$

тоді (12) можна записати у вигляді різницевої схеми:

$$\Delta_+ b_j = \frac{h}{h_1} \sum_i a_{ji} \frac{D_-}{D_+} \Delta_- b_j. \quad (14)$$

Розглядаючи n , c , λ як функції координати x , підставимо вираз (5) (11). Після деяких перетворень отримаємо:

$$D_- \left(\frac{\partial \ln P}{\partial x} \Big|_- + \sum_j a_{ji} \frac{\partial \lambda_j}{\partial x} \Big|_- - \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \Big|_- - \frac{\partial c_i}{\partial x} \Big|_- \right) =$$

$$= D_+ \left(\frac{\partial \ln P}{\partial x} \Big|_+ + \sum_j a_{ji} \frac{\partial \lambda_j}{\partial x} \Big|_+ - \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \Big|_+ - \frac{\partial c_i}{\partial x} \Big|_+ \right) \quad (14)$$

Товщини шарів h і h_1 вибираються таким чином, щоб клітини $\sigma+1$ σ можна було розглядати у взаємній термодинамічній рівновазі окремо від об'ємних, тобто стало б можливим застосувати до них умову рівності хімічних потенціалів, яка

в даному випадку може бути сформульована через параметри λ_{jm} , що мають сенс хімічного потенціалу на атом, як:

$$\lambda_{j\sigma} = \lambda_{j\sigma+1}. \quad (15)$$

Використовуючи граничну умову (9а) і рівність (15) з (14) можна отримати вираз для $\Delta_+ \phi$ явного вигляді:

$$\Delta_+ \phi_i = \ln \frac{P_{\sigma+1}}{P_{\sigma}} - \Delta_+ c_i - \frac{D_-}{D_+} \frac{h_1}{h} \delta \phi_{\text{гп}}, \quad (16)$$

де $\delta \phi_{\text{гп}}$ величина визначає вплив поверхні на концентрацію і-го речовини в приповерхневій зоні незалежно від інших речовин. Сенс цієї поправки буде ще очевидніший, якщо для вибору розмірів навколоповерхневих осередків скористатися критерієм

$$\frac{D_-}{D_+} \frac{h_1}{h} \cong 1. \quad (17)$$

Тоді отримуємо вираз для стрибка величини ϕ_{im} на кордоні:

$$\Delta_+ \phi_i = \ln \frac{P_{\sigma+1}}{P_{\sigma}} - \Delta_+ c_i - \delta \phi_{\text{гп}} \quad (18)$$

Якщо не враховувати енергетичного впливу поверхні на прилеглі шари, то нехтуючи останнім доданком (18), отримаємо:

$$\Delta_+ \phi_i \approx \ln \frac{P_{\sigma+1}}{P_{\sigma}} - \Delta_+ c_i. \quad (19)$$

Безпосередньою перевіркою можна переконатися, що вираз (19) описує рівновагу газ – тверде тіло у найпростішому випадку для розчинення речовини у твердому тілі, а також випаровування або конденсацію парів твердого тіла.

Алгоритм для розрахунку стаціонарного стану при впливі зовнішнього обурення матиме такий вигляд:

Крок 1. Для кожної m – ї комірки вирішимо систему рівнянь виду (4) щодо змінних λ_{jm} , P_m , n_{km} при деякому значенні кількості атомів у цій клітинці b'_{jm} (тут t – номер ітерації).

Крок 2. Для отриманого набору величин λ_{jm} для кожного осередку оцінимо вплив сусідніх, обчисливши поправку ϕ'_{im} з рівняння (8) $\phi(x)$.

Крок 3. Перерахуємо розподіл атомів b'^{t+1}_{jm} по осередках реактора з вирішення крайової задачі для $b(x)$ диференціального рівняння (10).

Крок 4. Оцінимо збіжність, порівнюючи значення величин n_{km} , λ_{jm} і ϕ_{im} , отриманих на поточній та попередній ітераціях, якщо норма їх різниці більша за деяку наперед задану величину ε , то слід перейти до початку нової ітерації.

Крок 5. За знайденими P_m , λ_{jm} і ϕ_{im} знайдемо n_{im} . Набір величин n_{im} і n_{km} – це потрібний розподіл.

Як початкове наближення можна взяти рівномірний розподіл b_{jm} , а для $\phi_{im} = 0$. Тоді першому кроці алгоритму буде отримано перше наближення для λ_{jm} .

Висновки. Таким чином, стаціонарний стан хімічної гетерофазної системи, викликаний точковим джерелом обурення хімічного складу, описується за допомогою мінімумів функціоналів виду (3), відповідних зсуву вільної енергії Гіббса від рівноважного значення в елементарних клітинах системи, поширення якого по системі описується диференціальними рівняннями (14). Вплив кордону враховується введенням стрибка зміщення (18) для узгодження масопереносу в газовій та конденсованій фазі. При цьому за рахунок розгляду прикордонних до поверхні розділу фаз зон (елементарних осередків) описується не тільки розчинення домішок у твердому тілі, але сорбційні явища. Важливо, у цьому сенсі, що величина $\Delta_+ c_i$, що відповідає стрибку вільної енергії поверхню – розчин описує зміну енергії вільної частки у процесі впровадження поверхневі шари твердого тіла. Отже, отримана математична модель, що описує систему типу газ – поверхня – тверде тіло, дозволяє описувати вплив процесів в об'ємі реактора на процеси, що протікають у приповерхневому шарі, виходячи з термодинамічних характеристик. Подальший розвиток моделі – це побудова тривимірної моделі масопереносу. Також бажано покращити автоматичний облік утворення нових фаз згідно з правилом Гіббса з автоматичною корекцією системи рівнянь.

Список літератури:

1. Wenxiao Hu, Kai Chen, Tao Tao, et al. High-rate growth of single-crystal diamond with an atomically flat surface by microwave plasma chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*. 2022. Nanjing, China. Vol. 763.
2. Lantos P.V., Jonson N.M., Street R.A. Light-enhanced hydrogen motion in SiH. *Phys. Rev. Lett.* 1991. Vol. 67. no. 19.
3. Lavrenko V.A., Podchernyaeva I.A., Shchur D.V., Zolotareno A.D., Zolotareno, A.D. Features of Physical and Chemical Adsorption During Interaction of Polycrystalline and Nanocrystalline Materials with Gases. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. Ukraine, 2018. Vol. 56, Issue 9–10. P. 504–511.
4. Юрченко І.О., Авраменко А.І., Щербак М.О. Фізична та колоїдна хімія Physical and colloidal chemistry. Ukraine : "Магнолія 2006", 2021. 950 с.

5. Boll R.H. Calculation of complex equilibrium with an unknown Number of Phases. *Journ. Chem. Phys.* Vols.34, 1960. P. 1108–1110.
6. Sancier K.M., Morrison S.R. Wisendanger H.V.O. Catalysis and chemical reaction rat of hyrogen atom with germanium. *J. Catalysis.* 1966. Vol. 5. № 2. P. 361–365.
7. Mafliet W. Series solutions of nonlinear coupled reaction diffusion equations. *J. Phys.Appl.* № 23. 1991. P. 5499–5503.
8. Jacucci G.,Poseth M. Monte Carlo calculation of latticovacancies by the method of overlapping distribution. *Solid State Comm.* 1980. Vols. 33, 11. P. 35–37.
9. Anderson J.O., Agen J. Models for numerical treatment of multicomponent diffusion in simple phases. *Appl. Phys.* 72, 1992. № 4. P. 1350–1353.
10. Wise H., Wood B.J. Reactive collision between gas and surface atoms. *Adv. at. and mol. Phys.* 1967. Vols. 3. P. 290–353.
11. Model calculations for hydride nucleations on oxide-coated metallic surfaces. *J. alloys and Compounds.* 1992. № 1. P. 11–23.
12. Johnson N.M., Doland C., Ponce F. Hydrogen in crystalline semiconductors. A review of experimental results. *Physica B.* 1991. Vol. 1–4. № 3–20. P. 3–20.
13. De Groot, Masur S. *Nonequilibrium thermodynamics.* USA : Courier Corporation. 1984. P. 510.
14. De Groot. About thermodynamics irreversible heat and a mass exchange. *Heat and mass transfer.* Минск : Наука и технологии. 1965. P. 63–70.
15. Bumstead H. A., Gibbs J. W. *Scientific Papers of J. Willard Gibbs.* 2015. Thermodynamics. USA : Creative Media Partners, LLC.
16. Lopushanskaya A.M. (Ed.). Thermodynamics of irreversible processes : *Sci. works.* 1992. Ukraine : Academy of Sciences of the USSR of IOHRAN.

Sgadov S.O. AN ALGORITHM FOR COMPOSITION MODELING OF NEAR-SURFACE LAYERS OF SOLIDS UNDER THE INFLUENCE OF ACTIVATED GAS PHASE

The article is devoted to the development of a mathematical model and algorithm that describes changes in the composition of the near-surface layers of a solid under the action of an activated gas phase. An extended one-dimensional heterogeneous system was chosen for modeling, which includes a gas mixture interacting with the surface of a crystalline sample; a zone of influence of an external excitation source; a gas phase with possible precipitation of condensed phases of individual substances, for example, on the passive walls of a reactor in which the system being modeled may be located; a near-surface region of a solid, the chemical composition of which undergoes changes under the action of an activated gas phase; a region of the volume of a solid, which can be considered as a rigid solution, the parameters of which can change under the action of changes in the gas phase. The model is based on the methods of equilibrium thermodynamics and gas kinetics, which allows taking into account the thermodynamic parameters obtained on the basis of independent experimental data. The proposed model makes it possible to estimate the equilibrium composition of elementary cells and its change during the activation of the gas phase. The system is divided into elementary cells, in which the thermodynamic parameters are homogeneous. It was found that the deviations from equilibrium in these cells are subject to corrections to the equilibrium chemical potentials of substances, which allows using the principle of minimum Gibbs free energy to calculate the distribution of substances both in the gas phase and in the solid. For this, the principle of microcirculation is used Onsager, according to which the size of the unit cell in the gas phase should be no less than the mean free path, and in a solid – more than the length of interatomic bonds. The article provides an example of the transition for the boundary conditions of the differential equations of mass transfer to the equations that describe the process of transferring the chemical potential shift. Also an algorithm for calculating the steady state under the influence of an external disturbance is presented.

Key words: *thermodynamics, equilibrium concentration, mass transfer, energy Gibbs, heterogenous system.*

Фролова Л.А.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Родін Д.О.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Нікітін М.О.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

ВПЛИВ СКЛАДУ ТА ПАРАМЕТРІВ СИНТЕЗУ НА КОЛЬОРОВІ І ФОТОКАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ Fe-Al-Co ШПІНЕЛЬНИХ ПІГМЕНТІВ

Шпінельні пігменти відносяться до групи складних металооксидних пігментів, які вивчаються дослідниками протягом багатьох років.

Широко використовуються пігменти зі структурою шпінелі в керамічній, хімічній, лакофарбовій промисловості. Такі пігменти охоплюють широкий діапазон кольорів і більшість з них термічно стабільні до 1400°C, стійкі до лугів, кислот. В даний час використовуються різні технології їх отримання, такі як: керамічна, золь-гель, плазмохімічна, високотемпературного синтезу. Високотемпературний процес синтезу неорганічних шпінельних пігментів, використовується найчастіше, але має ряд недоліків. З метою зниження енерговитрат і температури синтезу, при отриманні пігментів складної структури, в даній роботі використаний метод осадження вихідних компонентів у вигляді подвійних гідроксидів з подальшим промиванням, сушінням, випалом.

В статті розглянуто вплив модифікаторів на кольорні властивості пігментів у системі Fe-Co-Al-O-H та Fe-Co-Al-O. Встановлено, що яскраво-синій колір пігментам надає алюмокобальтова шпінель. У темнозабарвлених пігментах колір визначають ферошпінелі CoFe_2O_4 і Fe_3O_4 . Системи Fe-Co-O та Co-Al-O утворюють безперервні ряди твердих розчинів, у той час як Fe-Al-O, обмежено розчинні і утворюють тверді розчини лише до певних меж. Цим пояснюється той факт, що зі збільшенням мольної концентрації хромофора в шпінелях типу FeCo_2O_4 , інтенсивність забарвлення зразків рівномірно збільшується. Забарвлення шпінелей FeAl_2O_4 зі збільшенням вмісту Al_2O_3 змінюється від яскраво-жовтого через брудно-жовтий до білого. Фотокаталітична активність прожарених пігментів вища для складів Fe-Co та Co-Al. Тобто для отримання пігментів з необхідними властивостями (кольором, відтінком, інтенсивністю та фотокаталітичною активністю) потрібно чітко витримувати технологічні параметри. Таким чином, встановлені не тільки оптимальні співвідношення катіонів-хромофорів у складі шпінельних пігментів, але і можливість регулювання яскравості і насиченості кольору.

Ключові слова: фотокаталіз, колір, шпінель, ферити, гетит.

Постановка проблеми. Неорганічні пігменти вивчаються багатьма дослідниками протягом багатьох років [1-4]. Синтез високодисперсних, із заданими властивостями, шпінельних пігментів є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Шпінельні пігменти відносяться до групи складних металооксидних пігментів. Широко використовуються пігменти зі структурою шпінелі в керамічній і хімічній промисловості. Вони охоплюють широкий діапазон кольорів і більшість з них термічно стабільні до 1400°C. Вони стійкі

до лугів, кислот, розплавленого скла [5]. Іншою перевагою є їх повна ізоморфність, що дозволяє створювати багато проміжних кольорів [6, 7]. В даний час використовуються різні технології їх отримання: керамічна, золь-гель, плазмохімічна, високотемпературного синтезу [8, 9]. Майже завжди використовується високотемпературний процес для синтезу неорганічних пігментів, що має ряд недоліків. Відомо, що колір пігментів залежить від іонів хромофорів, що входять до складу кристалічної решітки пігментів. У пігментах, у тому числі і в шпінелях основними хро-

мофорами є іони перехідних металів: Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} , Cu^{2+} та ін. Вони мають неповністю завершену електронну оболонку і мають високу поляризаційну здатність.

З метою зниження енерговитрат і температури синтезу при отриманні пігментів складної структури, в даній роботі використаний метод осадження вихідних компонентів у вигляді змішаних гідроксидів з подальшим промиванням, сушінням, випалом.

Постановка завдання. Мета даної роботи – вивчення закономірностей забарвлення пігментів та визначення оптимальних складів для отримання шпінелей з використанням методу осадження та подальшої термообробки.

2. Методики проведення експерименту

Для одержання спільно осаджених гідроксидів використовували водні розчини солей. Умови синтезу варіювали за наступними параметрами: природа вихідних солей металів, співвідношення катіонів металів, концентрація розчинів солей (0,5 моль/л). Відтінки пігменту варіювали за рахунок додавання розчинів солей металів у різних співвідношеннях. Результати вимірювання кольорних характеристик обробляли за допомогою симплекс-решітчастого планування експерименту. Отримані значення відгуків наносили двовимірну діаграму в залежності від відповідних величин x_i .

Експерименти з каталітичного розкладання проводили в скляній посудині за 25°C при постійному струмуванні. УФ-лампа ДКВ 9 з ефективним спектральним діапазоном 180-275 нм використовувалася як джерело опромінення. Інтенсивність ультрафіолетового випромінювання становила близько 3 мВт/см². Концентрацію 4-нітрофенолу (4-НФ) визначали за допомогою спектрофотометра UV 5800 PC.

Ступінь розкладання розраховували щодо зменшення концентрації 4-НФ у водному розчині за формулами:

$$\%X = \frac{(\text{Co} - \text{Ct})}{\text{Co}} 100\% \quad (1)$$

де: C_0 – початкова концентрація 4-НФ у розчині, мг/л,

C_t – концентрація 4-НФ у розчині на момент часу t , мг/л.

Рентгенограми пігментів отримували на приладі ДРОН-2.0 в монохроматизованому мідному випромінюванні з нікелевим фільтром. Визначення кольорних характеристик і чистоти кольору проводили за допомогою компаратора кольору ФКЦШ-М.

Виклад основного матеріалу. Результати вимірювань кольорних характеристик пігментів системи Fe-Al-Co-O-H та Fe-Al-Co-O (до та після термообробки) наведено у таблицях 1 і 2 та рисунках 1-3. Аналізуючи отримані дані, можна сказати, що колір обумовлений фазовим складом утворених гідроксидів і оксигідроксидів. Жовтий колір зразка № 1 відповідає утворенню гетиту. Зміна насиченості жовтого кольору на стороні трикутника Fe-Al залежить від вмісту алюмінію. Причому кольороутворення відбувається згідно із законом адитивності. Присутність алюмінію призводить до утворення твердих розчинів оксигідроксидів заліза і алюмінію. Дослід № 4 відповідає утворенню гідроксиду алюмінію білого кольору. Зразки № 5 і 6 відповідають різному вмісту кобальту і визначають рожево-бузкові кольори утворених продуктів. Співосаджені оксигідрокси кобальту і заліза відповідають утворенню твердого розчину оксигідроксидів. Гідроксид кобальту має темно-зелений колір з тютюновим відтінком – довжина хвилі 591 нм відповідає жовто-зеленій ділянці спектру. Комбінації катіонів кобальту і заліза надають пігментам коричневий відтінки, переважна довжина хвилі яких 596 нм відповідає червоній області спектра.

Таблиця 1

Колірні характеристики пігментів Fe-Al-Co-O-H до прожарювання

№	Склад			КДВ, %	I	P, %	$X_{4-\text{нф}}^n$
	Fe	Al	Co				
1	1,00	0	0	36,49	588	69	75,75
3	0,67	0,33	0	33,85	599	50	88,51
2	0,33	0,67	0	33,24	596	40	78,56
4	0	1,00	0	94,25	700	1	42,4
6	0	0,67	0,33	79,97	700	5	51,34
5	0	0,33	0,67	62,68	605	10	80,32
7	0	0	1,00	26,15	591	15	53,04
9	0,33	0	0,67	28,33	596	40	70,51
8	0,67	0	0,33	18,76	595	30	61,37
10	0,33	0,33	0,33	25,23	595	35	71,43

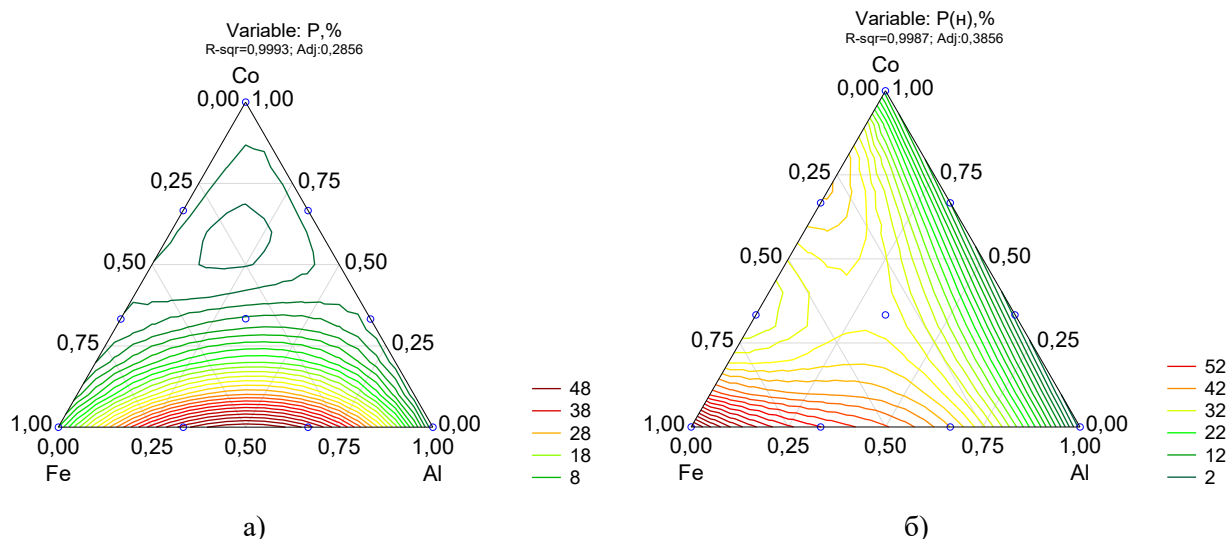


Рис. 1. Залежність чистоти кольору пігментів від хімічного складу а) температура синтезу 30°C б) температура синтезу 800°C

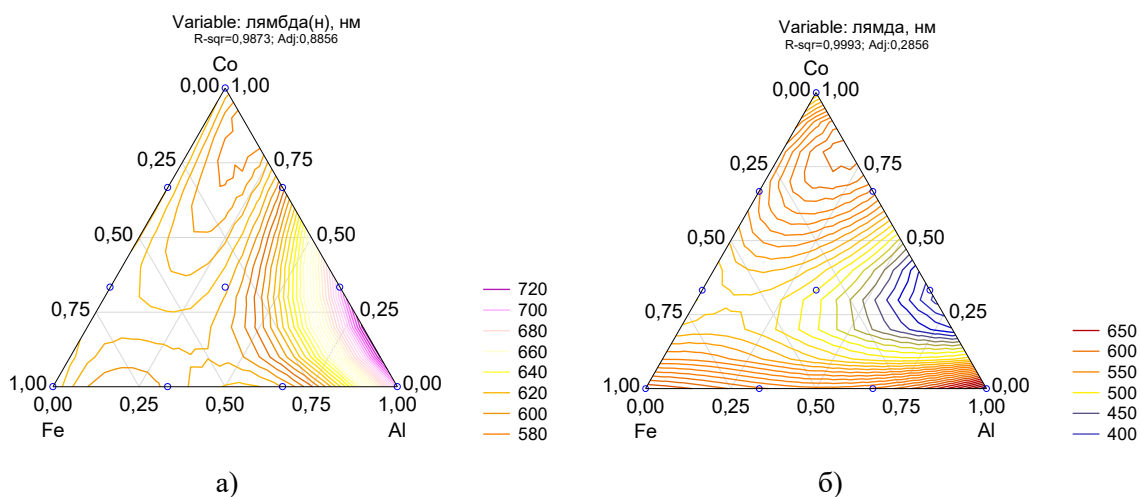


Рис. 2. Залежність колірної тону пігментів від хімічного складу а) температура синтезу 30°C б) температура синтезу 800°C

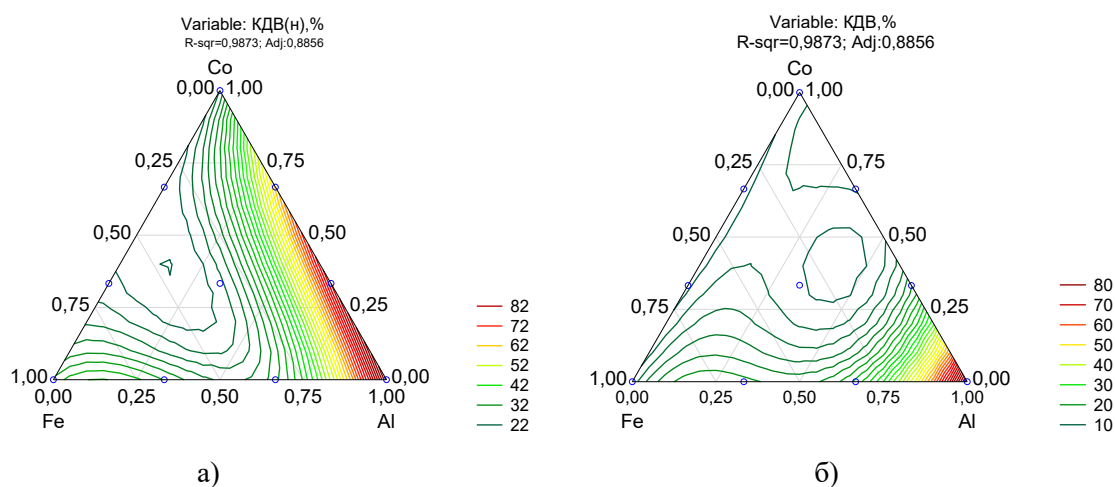


Рис. 3. Залежність КДВ пігментів від хімічного складу а) температура синтезу 30°C б) температура синтезу 800°C

Великий вміст заліза надає пігменту темно-коричневого кольору. Потрійна точка (Fe – Al – Co) має також коричневий колір.

Було виявлено позитивний вплив катіону алюмінію на блиск пігментів. Найбільший показник КДВ (коефіцієнт дзеркального відображення) свідчить про хороший блиск для точки № 4 (1.00 Al – 94,52%).

Оскільки чистота кольору Р – це ступінь наближення даного кольору до чистого спектрального, вираженого в частинах одиниці, найбільшою чистотою володіють кольори спектру. Тому чистота всіх спектральних кольорів приймається за одиницю, незважаючи на їх різну насиченість. Найбільш насичений синій колір, найменш – жовтий. Особливо насичені кольори спостерігаються в спектрі, який не містить домішок білого або чорного. Було встановлено, що додавання до катіонів заліза кобальту або алюмінію збільшує чистоту кольору приблизно на 20-25%. Для вивчення впливу термообробки пігменти прожарювали при 780-800 °С. Результати наведено у таблиці 2.

Після прожарювання, внаслідок утворення шпінелей, кольори змінилися. Кольороутворення відбувається у відповідності з утворенням шпінельних сполук. Показник яскравості і блиску знизився, але залишився досить високим у пігментів системи Fe-Al-O, до складу яких входить алюміній (0,67 Al – 24,35 %; 0,33 Al – 20, 62%). Потрібно враховувати те, що зі збільшенням чистоти кольору коефіцієнт відбиття збільшується.

При термообробці двокомпонентних пігментів колірний тон змінився наступним чином: у комбінаціях з алюмінієм він збільшився (579-630 нм), у комбінаціях з кобальтом – знизився (400-560 нм). Очевидно, що після термообробки відбувається зсув кольору в довгохвильову область спектру і до збільшення інтенсивності забарвлення. Наприклад, загальна присутність у розчині катіонів

заліза і алюмінію зумовила теракотово-червоний колір пігментів. Пігменти, до складу яких входили алюміній та кобальт, з рожевих перейшли у яскраво-сині. Комбінації кобальту із залізом дали сіро-коричневі відтінки. Це пов'язано з тим, що зазвичай інтенсивність кольору, що виникає при d-d переходах в іонах перехідних металів при октаедричному розташуванні порівняно мала. Однак через коливальний рух атомів у сполуці можлива поява слабкого поглинання світла. Ступінь насиченості кольору пігменту залежить також від його чистоти. З двох рівнонасичених кольорів більш насиченим сприймається світліший. Чистота кольору залишилася високою лише у пігментів, до складу яких входили залізо та алюміній (Р = 44%).

Найбільш характерні рентгенограми пігментів наведено в рисунках 4,5. Спільним для всіх рентгенограм є наявність складних сполук, які визначають колір пігментів. Інтенсивність кольору кобальтової шпінелі залежить від положення катіону кобальту в кристалічній структурі та його координаційного числа. Для сполук кобальту (точка № 5 табл. 2), в яких катіон кобальту знаходиться в тетраедричній координації, характерна довжина хвилі 579-580 нм. При співвідношенні, що відповідає точці № 6, присутність іонів кобальту в октаедричному оточенні призводить до появи поглинання в інтервалі довжин хвиль 400-410 нм. Крім того, якщо розглянути систему Co-Al-O, то число можливих шпінелей значно зростає за рахунок їх здатності до утворення твердих розчинів, в яких межі нормальних та обернених шпінелей розділені двофазним оксидом. Зазвичай шпінель CoAl_2O_4 відносять до прямої. Але шпінель можна представити як CoCo_2O_4 із заміщенням всього кобальту на алюміній. Цим можна пояснити незалежність виду рентгенограм від співвідношення алюмінію і кобальту. Очевидно, що чим більший вміст

Таблиця 2

Колірні характеристики пігментів Fe-Al-Co-O (після прожарювання за температури 800°C)

№	Склад			КДВ, %	, нм	Р, %	$X_{4-нф}$
	Fe	Al	Co				
1	1	0	0	12,76	630	10	68,35
2	0,67	0,33	0	20,66	602	45	80,7
3	0,33	0,67	0	24,47	601	45	77,48
4	0	1	0	85,85	700	0	81,34
5	0	0,67	0,33	19,16	400	1	68,38
6	0	0,33	0,67	12,12	579	1	70,08
7	0	0	1	10,61	500 $\ddot{y}$	0	66,76
8	0,33	0	0,67	9,34	560 $\ddot{y}$	1	75,68
9	0,67	0	0,33	9,48	510 $\ddot{y}$	0	74,75
10	0,33	0,33	0,33	10,19	499	4	77,56

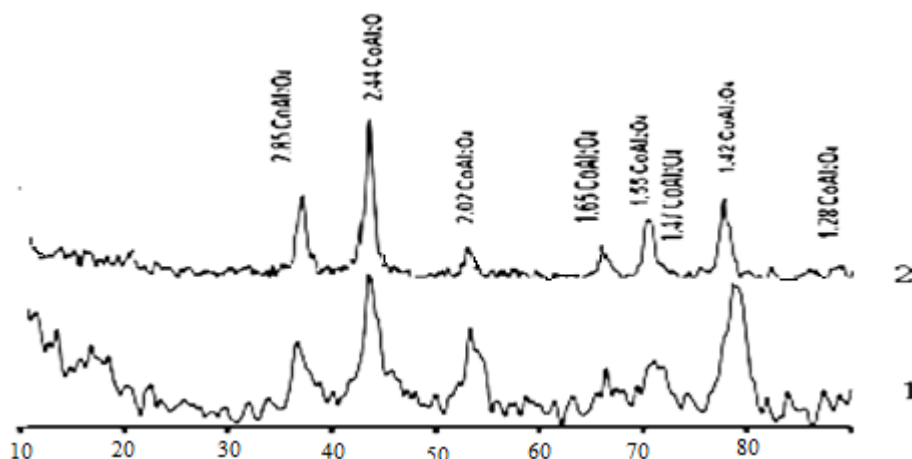


Рис. 4. Рентгенівські дифрактограми пігментів, отриманих співосадженням з прожарюванням за температури 800°C 1 – зразок 5 табл. 2, 2 – зразок 6 табл. 2

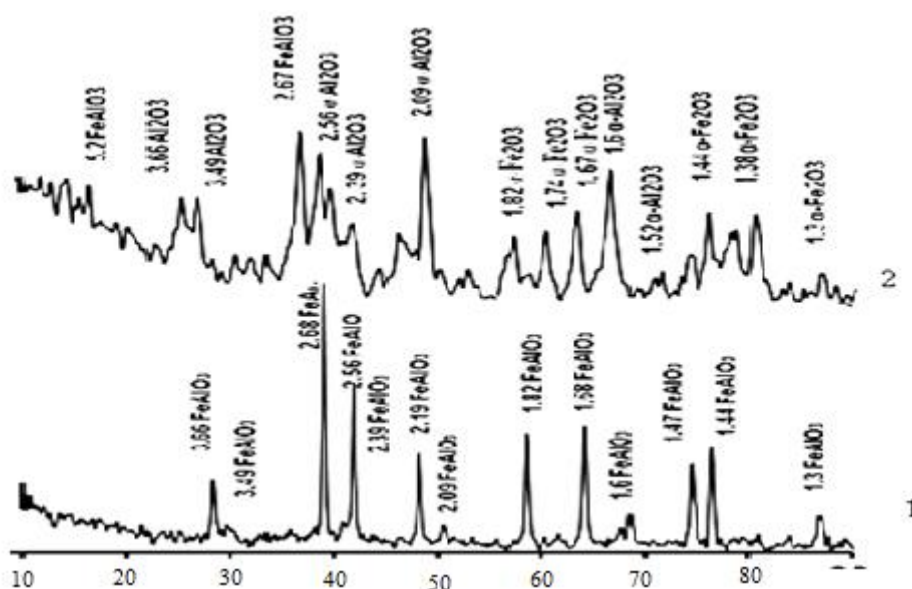


Рис. 5. Рентгенівські дифрактограми пігментів, отриманих співосадженням з прожарюванням за температури 800°C 1 – зразок 2 табл. 2, 2 – зразок 3 табл. 2

алюмінію, тим менше межа розчинності кобальту. Таким чином, на рентгенограмах спостерігається наявність однієї фази CoAl_2O_4 , а відрізняються вони ступенем кристалічності систем. Система Fe-Al-O характеризується залежністю фазового складу утворених речовин від вихідного складу. Збільшення кількості алюмінію призводить до появи сполуки FeAlO_3 та індивідуальних оксидів.

Фотокаталітичні властивості непрожарених пігментів вищі ніж після термообробки (шпінелей Fe-Al (рис. 6)). Склади, що відповідають сторонам трикутника Fe-Co та Co-Al після прожарювання за температури 800°C показали підвищення ступеню деструкції 4-НФ порівняно з отриманими за температури 30°C.

Висновки. В роботі було вивчено вплив модифікаторів на колірні властивості пігментів у системі Fe-Co-Al-O-H та Fe-Co-Al-O. Колір синіх пігментів обумовлений алюмокобальтовою шпінеллю. У темнозабарвлених пігментах колір визначають ферошпінелі CoFe_2O_4 і Fe_3O_4 .

Системи Fe-Co-O та Co-Al-O утворюють безперервні ряди твердих розчинів у той час, як Fe-Al-O, обмежено розчинні один в одному і утворюють тверді розчини лише до певних меж. Цим пояснюється той факт, що зі збільшенням мольної концентрації хромофора в шпінелях типу FeCo_2O_4 інтенсивність забарвлення зразків рівномірно збільшується, а забарвлення шпінелей FeAl_2O_4 зі збільшенням вмісту Al_2O_3 змінюється від яскраво-

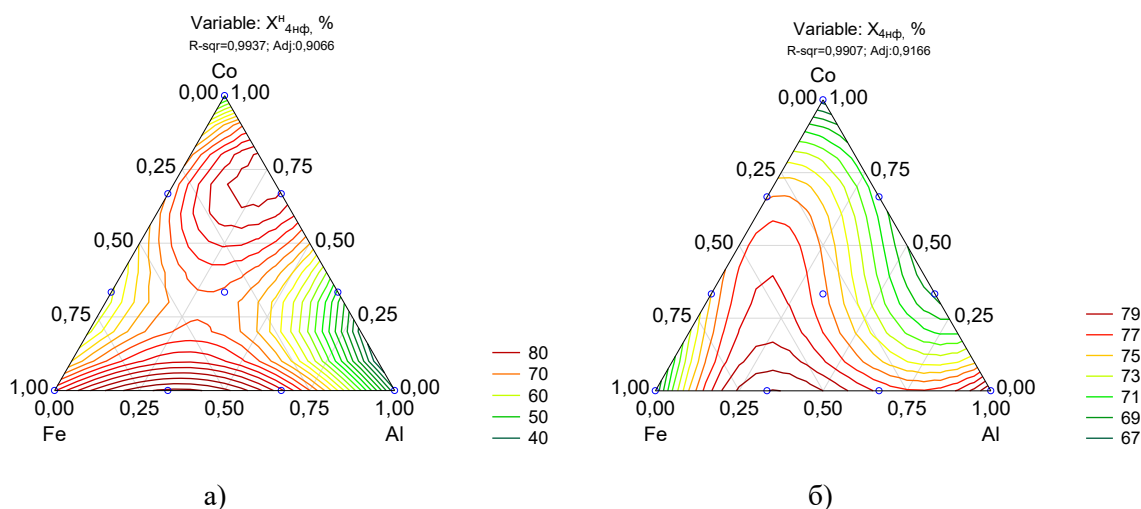


Рис. 6. Залежність ступеня фотокаталітичної деструкції 4-нітрофенолу в присутності шпінельних пігментів від хімічного складу а) температура синтезу 30°C б) температура синтезу 800°C

жовтого через брудно-жовтий до білого. Гранична розчинність Fe_2O_3 в Al_2O_3 становить близько 60%, а Al_2O_3 в Fe_2O_3 – 80%.

Фотокаталітична активність пігментів в реакції розкладу 4-НФ для прожарених пігментів вища для складів Fe-Co-O та Co-Al-O.

Тобто для отримання пігментів з необхідними властивостями (кольором, відтінком, інтенсивністю та фотокаталітичною активністю) потрібно

чітко витримувати оптимальні технологічні параметри. Таким чином, встановлені не тільки оптимальні співвідношення катіонів-хромофорів у складі шпінельних пігментів, але і можливість регулювання яскравості і насиченості кольору. На підставі проведених досліджень для одержання пігментів різної колірної гами пропонується технологія одержання шпінельних пігментів методом осадження та подальшою термообробкою.

Список літератури:

1. Peng X., Zhang Q., Cheng J., Yuan J., Wu Y., Jie J. Preparation and characterization of a stable nano-sized $\text{Zn}_x\text{Co}_{1-x}\text{Al}_2\text{O}_4$ ink for glass decoration by ink-jet printing. *Glass Physics and Chemistry*, 2017. 43, Pp. 246-256. <https://doi.org/10.1134/S1087659617030105>
2. Dalpasquale M., Mariani F. Q., Mueller M., Anaissi F. J. Citrus pectin as a template for synthesis of colorful aluminates. *Dyes and Pigments*, 2016. 125, Pp.124-131. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2015.10.015>
3. Dippong T., Mereu R. A. Effect of La^{3+} on thermal, structural and morphological properties of Zn-Co ferrite spinel-based pigments. *Ceramics International*, 2024. 50(7), Pp.10314-10324. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.12.343>
4. Ahmad Z., Tanveer M., Arslan M., Shafat M., Shahid M. A. Surface Morphological Characterization of $\text{Co}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ Spinel Ferrites Synthesized by Solid State Reaction Method. *Advances in Nanoparticles*, 2023. 12(3), Pp.139-146. DOI: 10.4236/anp.2023.123011
5. Fernández A. L., de Pablo L. (2002). Formation and the colour development in cobalt spinel pigments. *Pigment & resin technology*, 31(6), Pp. 350-356. <https://doi.org/10.1108/03699420210449043>
6. Dondi M., Zanelli C., Ardit M., Cruciani G., Mantovani L., Tribaudino M., Andreozzi G. B. Ni-free, black ceramic pigments based on Co-Cr-Fe-Mn spinels: A reappraisal of crystal structure, colour and technological behaviour. *Ceramics International*, 2013. 39(8), Pp. 9533-9547. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.05.072>
7. Tavakolipour R., Pournajaf R., Grazenaite E. (2024). Synthesis and doping of high-temperature resistant spinel nano pigments: A review, 2024. 4(1), Pp. 1-12 <https://doi.org/10.53063/synsint.2024.41191>
8. Molinari C., Conte S., Zanelli C., Ardit M., Cruciani G., Dondi M. Ceramic pigments and dyes beyond the inkjet revolution: from technological requirements to constraints in colorant design. *Ceramics International*, 2020. 46(14), Pp.21839-21872. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.302>
9. Kalendová A. Application of spinel pigments in anticorrosive heat-resistant coatings. *Pigment & resin technology*, 2000. 29(3), Pp.164-172. <https://doi.org/10.1108/03699420010334321>

Frolova L.A., Rodin D.O., Nikitin M.O. INFLUENCE OF COMPOSITION AND SYNTHESIS PARAMETERS ON COLOR AND PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF Fe-Al-Co SPINEL PIGMENTS

Spinel pigments belong to the group of complex metal oxide pigments, which have been studied by many researchers for many years. Pigments with a spinel structure are widely used in the ceramic, chemical, and paint industries. Such pigments cover a wide range of colors and most of them are thermally stable up to 1400°C, resistant to alkalis and acids. Currently, various technologies are used for their production, such as: ceramic, sol-gel, plasma-chemical, high-temperature synthesis. The high-temperature process of synthesis of inorganic spinel pigments is used most often, but has a number of disadvantages. In order to reduce energy consumption and synthesis temperature when obtaining pigments of complex structure, this work used the method of precipitation of starting components in the form of double hydroxides with subsequent washing, drying, and firing. The article considers the influence of modifiers on the color properties of pigments in the Fe-Co-Al-O-H and Fe-Co-Al-O systems. It was found that the bright blue color of the pigments is given by aluminum-cobalt spinel. In dark-colored pigments, the color is determined by ferros spinels CoFe_2O_4 and Fe_3O_4 . The Fe-Co-O and Co-Al-O systems form continuous series of solid solutions, while Fe-Al-O is limitedly soluble and forms solid solutions only to certain limits. This explains the fact that with an increase in the molar concentration of the chromophore in spinels of the FeCo_2O_4 type, the color intensity of the samples increases uniformly. The color of FeAl_2O_4 spinels with increasing Al_2O_3 content changes from bright yellow through dirty yellow to white. The photocatalytic activity of calcined pigments is higher for the Fe-Co and Co-Al compositions. That is, to obtain pigments with the necessary properties (color, shade, intensity and photocatalytic activity), it is necessary to clearly maintain technological parameters. Thus, not only the optimal ratio of cations-chromophores in the composition of spinel pigments has been established, but also the possibility of adjusting the brightness and saturation of the color.

Key words: photocatalysis, color, spinel, ferrites, goethite.

УДК 661.094.56
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/34>

Шкода В.О.

Дніпровський державний технічний університет

Кравченко О.В.

Дніпровський державний технічний університет

Гуляєв В.М.

Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А.Л.

Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ АДСОРБЦІЙНОГО УЛОВЛЮВАННЯ ПЛАТИНИ, ЩО ВТРАЧАЄТЬСЯ ПІД ЧАС КОНТАКТНОГО ОКИСНЕННЯ АМОНІАКУ У ВИРОБНИЦТВІ НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

В технології виробництва нітратної кислоти під час каталітичного окиснення амоніаку киснем повітря здебільшого застосовують платиноїдні каталізатори. У процесі їх експлуатації відбувається зниження ефективності дії каталізатора, що пов'язано з відкладенням на його осадів і фізичним руйнуванням структури матеріалів, з яких він виготовлений. Сьогодні у світі загальні втрати платини становлять близько 5 т/рік. Для забезпечення сталої ефективності виробництва HNO_3 застосовують різні способи регенерації відпрацьованих каталізаторів. Стаття присвячена розробці способу зменшення втрат платиноїдів у виробництві нітратної кислоти за рахунок застосування адсорбційної оксидної уловлювальної маси. Для забезпечення необхідних поглинаючих характеристик маси необхідна відповідна модифікація, наприклад, підвищення питомої поверхні за рахунок тонкого подрібнення матеріалу в кульових млинах. У даному дослідженні як основу уловлювальної маси використовували кальцій оксид, отриманий під час подрібнення на дезінтеграторі в повітряному середовищі за швидкості обертання 5000, 10000, 15000 та 20000 об/хв. Встановлено, що отримана шихта мала розмір частинок близько 2 мкм, що дало змогу інтенсифікувати взаємодію між CaO і Pt за рахунок збільшення площі питомої поверхні. У результаті дослідження впливу температури в діапазоні 400–800 °C на ефективність уловлювання частинок платини встановлено оптимальне місце розміщення уловлювальної маси – у безпосередній близькості від каталізаторних сіток. У статті розкрито теоретичний механізм уловлювання платини, який полягає в утворенні сполуки $\text{CaO} \cdot \text{PtO}_2$ на поверхні уловлювальної маси. З'ясовано, що для підвищення міцності адсорбційного матеріалу запропоновано вводити до складу шихти композицію складу $\text{CaO} + \text{CaCl}_2 + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ у кількості 10% від маси основного компонента. Для отримання пористої структури матеріалу обґрунтовано застосування вигораючої добавки – деревного вугілля. Розроблена адсорбційна маса може бути застосована для уловлювання платини в технології виробництва нітратної кислоти з метою її рециклінгу.

Ключові слова: платиноїдний каталізатор, каталітичне окиснення, селективність, регенерація, оксидний адсорбент, дезінтеграція.

Постановка проблеми. Нині основним промисловим способом отримання нітратної кислоти є каталітичне окиснення амоніаку киснем повітря. Оскільки стадія конверсії амоніаку визначає показники всього виробництва нітратної кислоти, від умов її проведення залежать витратні коефіцієнти та техніко-економічні показники виробництва HNO_3 [1, с. 45]. Проведено численні дослідження з підбору каталізаторів, технологічних умов процесу, апаратного оформлення, виявлення причин і зниження втрат каталізатора.

Найперспективнішим каталізатором для процесу окиснення амоніаку до нітроген (II) оксиду є платина, яка за активністю та селективністю перевершує всі інші вивчені зразки каталізаторів, що застосовуються в технології виробництва нітратної кислоти [2, с. 100].

Платина проявляє дуже високу каталітичну активність, забезпечуючи за 600–1000 °C високий вихід нітроген (II) оксиду (до 99%). Цей метал має низьку температуру ініціювання реакції (195–200 °C), має хорошу пластичність, ков-

кість і тягучість [3, с. 230]. Недоліками платини є її схильність до руйнування при конверсії під впливом реакційної суміші та схильність до впливу великої кількості отрут. З цих причин як каталізатори окиснення амоніаку використовують сплави платини з різними металами. Поширення набули сплави платини з родієм, паладієм і рутенієм, які мають високу температуру плавлення, легко піддаються механічній обробці. У виробництві нітратної кислоти платиноїдні каталізатори застосовуються здебільшого у вигляді сіток, зручних в експлуатації.

У процесі експлуатації відбувається зниження ефективності платинових каталізаторів, що пов'язано з відкладенням на них осадів, які утворюються в результаті протікання хімічних реакцій під впливом каталітичних отрут, що містяться в сировині. У результаті цього виникає необхідність регенерації каталізаторів. Спосіб регенерації платинових каталізаторів [4, с. 52] полягає в тому, що відпрацьований каталізатор обробляють розчинами мінеральних кислот, потім хлорвмісним газом при температурі 120 °С з подальшим відновленням у потоці водню при температурі 450 °С. Недоліком способу є застосування хлорвмісного газу за високої температури, що спричиняє корозію апаратури.

Інший спосіб передбачає відмивання каталізатора від різних металевих домішок 1,0 М розчином органічної або мінеральної кислоти, обробку відмитого каталізатора хлоро-повітряною сумішшю за парціального тиску хлору $\leq 0,05$ ат та температури ≤ 100 °С з подальшим прожарюванням каталізатора кисневмісним газом при температурі 450 °С з метою переведення платини в активну форму. Пропонований спосіб дає змогу виключити застосування дорогих хромонікелевих сталей для виготовлення апаратури, а також спрощує технологію, оскільки оброблення хлором проводять за більш низької температури (< 100 °С) [5, с. 115].

Після багаторазового проведення процесу регенерації каталізатор неминуче втрачає ефективність. При цьому його подальше використання стає недоцільним і виникає необхідність виділення дорогоцінного металу, що міститься в ньому. Для цього використовують методи хлорування або вилугування. У разі використання методу хлорування відпрацьований каталізатор обпалюють на повітрі за температур ≤ 870 °С і обробляють хлорувальним агентом, таким як $AlCl_3$, $SiCl_4$, тощо [6, с. 103]. Утворені сполуки абсорбують водою і з отриманого розчину виділяють платину шляхом відновлення алюмінієм, цинком тощо.

Метод вилугування заснований на використанні як кислих, так і лужних розчинів. При використанні кислоти відпрацьований каталізатор обпалюють за температури 800 °С для видалення органічних речовин, а потім протягом декількох годин вилуговують 20–60% розчином сульфатної кислоти або 20–50% розчином хлоридної кислоти за 100–140 °С [7, с. 67]. Цю реакцію проводять за підвищеного тиску – до 5,0 МПа. Потім з отриманого шламу виділяють платину.

У лужному процесі відпрацьований каталізатор піддають плавленню з надлишком натрій гідроксиду. Утворений розплав вилуговують водою і з отриманого концентрату виділяють металічну платину. Розчинення каталізатора проводять у 40%-ому розчині NaOH за температур 120–145 °С.

Усі ці способи мають значні обмеження. Видалення органічних сполук із каталізатора проводять за температур 800–1200 °С, що потребує значних витрат енергії та ускладнює проведення процесу. Внаслідок великої кількості стадій процесу, таких як випал, плавлення, осадження, декантування, фільтрування та ін., втрати платини досягають 3–5%. При проведенні лужного процесу виникає необхідність у переробці утвореного розчину алюмінату натрію, а в разі кислого процесу потрібне застосування великих кількостей кислоти. Наявність зазначених недоліків вимагає подальшого вдосконалення процесів регенерації матеріалу каталізатора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Величина втрат платиноїдного каталізатора у виробництві нітратної кислоти пропорційна кількості амоніаку, що окиснюється на каталізаторі, і температурі контактування. Так, під атмосферним тиском за температури контактування 800–830 °С втрати становлять 0,045–0,050 г/т кислоти, а під підвищеним тиском за температур 900–920 °С досягають 0,15–0,20 г/т [8, с. 937]. Втрати платини для заводу середньої продуктивності 300 тис. т HNO_3 на рік становлять 45–60 кг. Нині в усьому світі втрати дорівнюють 4,85 т платини на рік. Будівництво агрегатів з виробництва нітратної кислоти великої потужності (1000–1500 т/добу) можливе тільки за використання підвищеного тиску, за якого різко зростають втрати каталізатора внаслідок підвищення температури. У цих умовах економія платиноїдних металів набуває особливого значення.

Намічається два шляхи вирішення цієї проблеми. Перший з них – заміна платинового каталізатора на неплатиновий [9, с. 104644]. Але досі ще не розроблено такого каталізатора, який би

наближався за активністю і часом її збереження до платиногого. Внаслідок того, що повністю відмовитися від каталізатора з платиноїдних металів нині неможливо, необхідно розробити способи вловлювання і повернення втраченого каталізатора у виробництво. Частинки платини, родію і паладію розміром ≥ 40 мкм становлять 40–45%, а решта – ≤ 5 мкм [10, с. 182], причому останні уловити найбільш складно.

В нітратній промисловості платину вловлюють за допомогою фільтрів зі скляної вати, що розміщуються після котлів-утилізаторів. Ступінь уловлювання такими фільтрами не перевищує 30%. Для уловлювання платини також застосовують кільця Рашига, виконані з металу або кераміки [11, с. 128266], при ступені уловлювання 50–55%. Застосовують також жароміцні сітки та кільця, вкриті шаром золота або срібла, які поміщають у контактному апараті в зоні з температурою близько 660 °C [12, с. 111].

Відомо багато пропозицій щодо уловлювання платини різними масами з вогнетривких матеріалів [13, с. 27]. Ефективний спосіб уловлювання [14, с. 40] застосовує шматочки мармуру, які завантажуються в кошик товщиною 100–150 мм під каталізаторними сітками, що гарантує 80% уловлювання. Також запропоновані уловлювальні маси, що складаються переважно з вогнетривких матеріалів [15, с. 13]. Були досліджені вапно, доломіт, SiO_2 , MgO та ін. Встановлено, що Fe_2O_3 і SiO_2 платину практично не вловлюють, а маси на основі MgO вловлюють у 6 разів менше платини, ніж на основі CaO .

Для уловлювання дорогоцінних металів, що втрачаються каталізатором під час окиснення амоніаку, випробувано силікагель, оксиди цирконію та алюмінію, цеоліти, різні суміші оксидів барію, кальцію, цинку і деякі інші матеріали. Показано, що силікагель і цеоліти незважаючи на дуже велику поверхню, майже не вловлюють платину; краще працюють ZrO_2 і Al_2O_3 , і найефективніше – маси на основі кальцій оксиду [16, с. 114383]. З цього можна зробити висновок, що уловлювальні маси працюють не як фільтри, а як речовини, з якими платина вступає в хімічну взаємодію.

Постановка завдання. Мета дослідження – визначити ефективність застосування адсорбційної маси на основі оксиду кальцію для поглинання частинок платини з потоку відхідних газів, що утворюються під час контактного окиснення амоніаку.

Виклад основного матеріалу. Після того, як було встановлено, що найкраще вловлює платину маса на основі CaO , було відпрацьовано

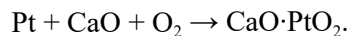
методику її приготування, в результаті чого маса набула високої термічної стійкості і механічної міцності. Лабораторні дослідження показали, що цей матеріал уловлює до 70% платини, яку втрачає каталізатор.

Для визначення місця розміщення уловлювальної маси у вузлі окиснення амоніаку дослідження проводили за різних температур (800, 600 і 400 °C). Встановлено, що чим вища температура, тим вище ступінь уловлювання. Це означає, що розміщувати масу слід у безпосередній близькості від каталізаторних сіток. Якщо за 800 °C уловлювання становило 70–75%, то за 400 °C – 20–25%. Мікроструктурний аналіз частинок маси з уловленою платиною показав, що платина сідає тільки на поверхні маси, дуже тонким шаром, не проникаючи всередину. Це свідчить про те, що платина, ймовірно, взаємодіє з поверхнею шматочків з CaO шляхов так би мовити «приварювання». Взаємодія частинок платини з поверхнею маси тим ефективніша, чим вища температура. Частинки платини взаємодіють з поверхнею маси, поки вона вся не буде заповнена, а наступні частинки зварюються з уже осілими доти, доки вони не перестануть зчіплюватися. З часом ступінь уловлювання платини закономірно зменшується.

Висловлено кілька точок зору на механізм уловлювання платини. Наприклад, у роботі [17, с. 485] вважають, що втрати платини під час окиснення амоніаку виникають не через механічне відривання частинок металу від каталізаторних сіток, а внаслідок хімічних реакцій. Рентгенографічні дослідження показують, що в нальоті на шматочках уловлювальної маси металевої платини дуже мало (у вигляді первинної металевої платини не більше 1%). Можна припустити, що від платинових сіток платина відривається у вигляді летючого оксиду PtO_2 .

Уловлювання кальцій оксидом полягає в тому, що між PtO_2 і CaO відбувається хімічна реакція. Інші сполуки кальцію, наприклад CaSO_4 кальцію, з платиною майже не взаємодіють. Термографічні дослідження вказують на те, що PtO_2 є нестійкою сполукою, яка за температури 700 °C розкладається до Pt і O_2 . Але в присутності реакційно-здатного кальцій оксиду PtO_2 не розкладається.

Згідно з [18, с. 82], сполуки, що утворюються в умовах промислового окиснення амоніаку, можна одержати штучно під час взаємодії металевої платини з кальцій оксидом за реакцією:



Втрати платини бувають двох типів – механічні (внаслідок процесів дезінтеграції та рекристалізації

структури платинового дроту, а також – під час переходу платини в газову фазу, що відбувається під час взаємодії металу з компонентами нітрозних газів [19, с. 1928]. Припущення, що втрати відбуваються в газовій фазі через утворення леткого оксиду платини, найбільш правдоподібне. Про це свідчить і те, що добавка менш леткого родію до платини сприяє підвищенню міцності сплаву каталізаторних сіток.

У результаті відпрацювання методів приготування вловлювальної маси на основі CaO встановлено, що запропонований склад вловлює $>50\%$ Pt , але для підтримання високих ступенів конверсії амоніаку необхідно конвертувати якомога чистіші гази. Оксиди заліза та пил знижують ступінь контактування на платиноїдному каталізаторі й ефективність уловлювання, екрануючи поверхню уловлювальної маси.

Вибір кальцій оксиду зумовлений значно більшою здатністю сорбувати платиноїди, на відміну від магній оксиду або алюміній оксиду, які володіють хорошою вологостійкістю, але мають ушестеро меншу сорбційну здатність, порівняно з CaO [20, с. 100327].

У даній роботі модифікація адсорбційної маси полягала в одержанні адсорбенту на основі CaO , що має підвищену вологостійкість і розвинену пористу поверхню. Збільшення поверхні дає змогу підвищити сорбційну здатність за платиноїдами, проте призводить до стоншення стінок каналів і пор, тобто до втрат адсорбенту.

У роботі використовувався CaO , отриманий під час подрібнення негашеного вапна на дезінтеграторі в повітряному середовищі за швидкості обертання ротору 5000, 10000, 15000, 20000 об/хв. Отримана шихта мала розмір частинок близько 2 мкм, що дало змогу інтенсифікувати взаємодію між компонентами завдяки збільшенню поверхні. Спроби досягти більш високого значення питомої поверхні за рахунок дворазового оброблення при однаковому режимі роботи дезінтегратора призводить до зменшення питомої поверхні часток внаслідок їх агрегації, що небажане (рисунок 1).

При дезінтеграції відбуваються виникнення і розвиток внутрішніх напружень в об'ємі зразка. Отримати близькі значення фракційного складу можливо за рахунок подрібнення вихідного зразка в дезінтеграторі завдяки розриву зв'язків між частинками. Це дає змогу значно зменшити вплив внутрішніх напружень за умови рівномірного розподілу частинок, які беруть участь у хімічних реакціях.

Введення гідравлічно-активної добавки $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ у кількості 10% від маси основного компонента, поряд з ущільненням шихти, дає змогу

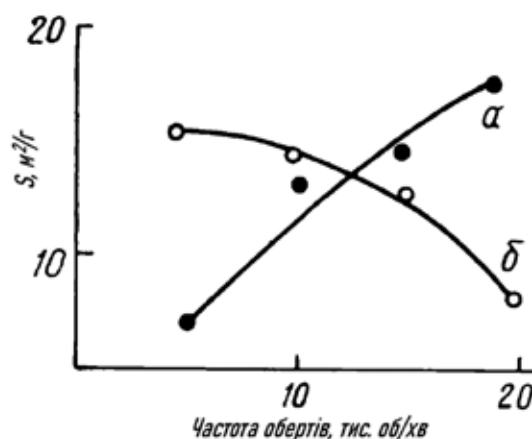


Рис. 1. Зміни питомої поверхні зразків адсорбенту після обробки в дезінтеграторі

α – одноразова обробка; δ – дворазова обробка

підвищити міцність, що зменшує втрати адсорбенту. Як основну композицію для адсорбенту запропоновано склад: $\text{CaO} + \text{CaCl}_2 + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

У літературі немає даних, які підтверджують утворення нових хімічних сполук для пропонованої композиції в області $490\text{--}530^\circ\text{C}$ [21, с. 521]. Застосування звичайного CaO під час гідратації створює метастабільну структуру $\text{Ca}(\text{OH})_2$, на що вказує ендотермічний ефект реакції при температурі 450°C [22, с. 265]. Якщо застосувати CaO , подрібнений в дезінтеграторі за 15000 об/хв, забезпечується вищий ступінь гідратації CaO та виникнення більш щільної та стабільної структури $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Використання неподрібненого CaO призводить до утворення менш щільної структури запропонованої композиції, а це своєю чергою спричиняє фізичне зв'язування води в міжпоровому просторі, на що вказує значна втрата в масі при $90\text{--}150^\circ\text{C}$ [23, с. 499]. Аналогічна картина спостерігається для суміші 50:50 дезінтегрованого оксиду кальцію, отриманого за 10000 і 15000 об/хв. Це також свідчить про нещільне пакування часток композиції, яка утворюється, та про значний вміст фізично зв'язаної води. Дезінтегрований за 15000 об/хв CaO в процесі гідратації сприяє утворенню щільної структури композиції при практичній відсутності фізично зв'язаної води в адсорбенті. При порівнянні ступеня гідратації звичайного і дезінтегрованого зразків CaO встановлено, що в останньому відбувається сильніша взаємодія між частинками під час кристалізації гідратної фази.

Унаслідок спікання відбувається зміна поверхні за рахунок зменшення загального об'єму та радіусу пір, що відображається на сорбційній ємності уловлювальної маси. Для отримання пористої структури як основний компонент вводять виго-

пряую добавку вугілля, яка може перебувати як на поверхні, так і всередині об'єму адсорбенту. Під час розкладання солей, що використовуються для приготування адсорбенту, відбувається виділення газоподібних продуктів у широкому інтервалі температур, що дають дуже дрібні пори і відкривають доступ повітря до частинок вугілля, які перебувають усередині адсорбенту. Останні поступово вигорають, формуючи пористу структуру.

Використання вигоряючої добавки дає змогу проводити рівномірне прожарювання, зменшуючи вплив неоднорідності структури, яка сприяє виникненню напружень. Отриманий нами адсорбент мав розвинену поверхню ($40 \text{ м}^2/\text{г}$) і пори, що змінюють свій радіус у широкому інтервалі. Наявність великих пір діаметром $1,5\text{--}2,0 \text{ мкм}$ дало змогу сорбувати частинки платиногого каталізатору не лише у вигляді механічного виносу, а й у вигляді парів оксиду металу об'ємом адсорбенту, на відміну від адсорбенту з питомою поверхнею $2,05\text{--}2,92 \text{ м}^2/\text{г}$, на якому відбувається лише хімічна взаємодія парів Pt з поверхнею [24, с. 866].

Важливим показником адсорбентів, що працюють у процесі окиснення амоніаку, є вологостійкість. Для порівняння було приготовано зразок за методикою, описаною в [25, с. 60], і три зразки на основі запропонованої композиції з дезінтегрованого CaO, отриманих за 5000, 10000, 15000 об/хв.

Вологостійкість визначали за повного занурення зразків у воду після прожарювання за 900°C протягом 1,5 год. Гідратація контрольного зразка наставала через 5–7 хв, зразків, приготованих із дезінтегрованого оксиду кальцію, – через 15, 20 і 50 хв, відповідно. Збільшення часу гідратації може бути пов'язане з більш щільним пакуванням частинок в одиниці об'ємі дезінтегрованого CaO. Крім того, щільне пакування частинок усуває порожнини, тим самим ліквідує центри, де найімовірніше відбувається процес гідратації.

Отримані експериментальні дані показують, що використання дезінтегрованого CaO дає змогу отримувати вологостійкий адсорбент. У процесі приготування адсорбенту утворюються нові сполуки, що відповідають за формування кристалізаційної структури.

Висновки. Встановлено два основні шляхи зменшення втрат платинового каталізатора під час контактного окиснення амоніаку: перший – заміна платинового каталізатора на неплатиновий, другий – вловлювання каталізатора, що втрачається, і повернення його у виробництво. Досліджено можливість окиснення амоніаку під підвищеним тиском на комбінованому каталізаторі з отриманням високого виходу продукту. Розроблено уловлювальну масу зі ступенем уловлювання платини 60–80% і визначено місце розміщення цієї маси.

Список літератури:

1. Кравченко І. В., Зубцов Є. І. Підвищення економічної та екологічної ефективності виробництва нітратної кислоти фотоокисненням N_2O у нітрозних газах. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 9. С. 42–48.
2. Векшин В. О. та ін. Визначення стабільності нанесеного платинового каталізатора селективного відновлення оксидів нітрогену. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2012. № 3. С. 98–102.
3. Черненко Я. М., Волошин М. Д., Ларичева Л. П. Каталізатори та сорбенти : навч. посіб. Кам'янське: ДДТУ. 2017. 317 с.
4. Янушевська О. І., Кринець Г. В., Літинська М. І. Інноваційні хімічні технології переробки вторинних матеріалів. Частина 1 : навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 99 с.
5. Основи технології переробки відходів : підручник / О. І. Янушевська та ін. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 175 с.
6. Лобойко О. Я. та ін. Окиснення амоніаку на реставрованому платиновому каталізаторі. *Питання хімії та хімічної технології*. 2010. № 2. С. 102–104.
7. Екологія у виробництві тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : навч. посіб. / В. П. Шаповал та ін. Харків: Технологічний Центр, 2018. 180 с.
8. Granados-Fernández R. et al. Platinum recovery techniques for a circular economy. *Catalysts*. 2021. Vol. 11. No 8. P. 937. <https://doi.org/10.3390/catal11080937>.
9. Ding Y. et al. Highly efficient recovery of platinum, palladium, and rhodium from spent automotive catalysts via iron melting collection. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. P. 104644. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104644>.
10. Barakat M. A., Mahmoud M. H. H. Recovery of platinum from spent catalyst. *Hydrometallurgy*. 2004. Vol. 72. No 3–4. P. 179–184. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00141-5](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00141-5).
11. Tang H. et al. Recovery of platinum-group metals from spent catalysts by microwave smelting. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 318. P. 128266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128266>.

12. Dong H. et al. Recovery of platinum group metals from spent catalysts: a review. *International Journal of Mineral Processing*. 2015. Vol. 145. P. 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.06.009>.
13. Jha M. K. et al. Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review. *Hydrometallurgy*. 2013. Vol. 133. P. 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.11.012>.
14. Tsirambides A., Filippidis A. Critical and Strategic Metal Resources of Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 2024. Vol. 61. No 1. P. 10-43. <https://doi.org/10.12681/bgsg.37171>.
15. Asadzadeh M., Sajadi S. A. A. Separation and recovery of platinum and palladium from spent petrochemical catalysts using activated carbon, analysis of two kind of most used catalysts in petro chemistry. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*. 2018. Vol. 37. No 5. P. 9-18.
16. Sun S. et al. A review on management of waste three-way catalysts and strategies for recovery of platinum group metals from them. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 305. P. 114383. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114383>.
17. Prasetyo E., Anderson C. Platinum group elements recovery from used catalytic converters by acidic fusion and leaching. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 4. P. 485. <https://doi.org/10.3390/met10040485>.
18. Ivanova A. et al. Formation of Pt(O)/Si(Ca)O₂ nanofibers upon the reaction of platinum aerosol particles with a calcium-and silicon-containing material. *Doklady Physical Chemistry*. 2006. Vol. 407. No 1. P. 80-83. <https://doi.org/10.1134/S0012501606030067>.
19. Duclos L. et al. Closing the loop: Life cycle assessment and optimization of a PEMFC platinum-based catalyst recycling process. *Green Chemistry*. 2020. Vol. 22. No 6. P. 1919-1933. <https://doi.org/10.1039/C9GC03630J>.
20. Kolbadinejad S., Ghaemi A. Recovery and extraction of platinum from spent catalysts: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023. Vol. 7. P. 100327. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100327>.
21. Reckeweg O., DiSalvo F. J. Alkaline earth metal oxyhalides revisited—syntheses and crystal structures of Sr₄OBr₆, Ba₄OBr₆ and Ba₂OI₂. *Zeitschrift für Naturforschung B*. 2008. Vol. 63. No 5. P. 519-524. <https://doi.org/10.1515/znbn-2008-0507>.
22. Boswell F. C., Meisinger J. J., Case N. L. Production, marketing, and use of nitrogen fertilizers. *Fertilizer technology and use*. 1985. P. 229-292.
23. Trindade A. F., Gois P. M. P., Afonso C. A. M. Recyclable stereoselective catalysts. *Chemical reviews*. 2009. Vol. 109. No 2. P. 418-514. <https://doi.org/10.1021/cr500084c>.
24. Palma V. et al. Platinum based catalysts in the water gas shift reaction: Recent advances. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 7. P. 866. <https://doi.org/10.3390/met10070866>.
25. Гринь Г.І., Казаков В.В., Кузнецов П.В. Дослідження й розробка каталізаторів в нітратній промисловості науковою школою В.І. Атрощенко. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2007. № 6/3 (30). С. 58–62.

Shkoda V.O., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. STUDIES OF ADSORPTION CAPTURE OF PLATINUM LOST DURING CONTACT OXIDATION OF AMMONIA IN THE PRODUCTION OF NITRIC ACID

Platinum catalysts are mostly used for the production of nitric acid during the catalytic oxidation of ammonia with oxygen. During operation, the efficiency of the catalyst decreases because of the deposition of sediments on its surface and physical destruction of the structure of the materials from which it is made. Currently, the total loss of platinum worldwide is approximately five tons per year. To ensure the sustainable efficiency of HNO₃ production, various methods for the regeneration of spent catalysts have been used. This article is devoted to the development of a method for reducing platinum losses in the production of nitric acid using an adsorption oxide catching mass. To ensure the required absorption characteristics of the mass, an appropriate modification is required, for example, increasing the specific surface area by fine grinding the material in ball mills. In this study, the calcium oxide obtained during grinding in a disintegrator in an air environment at rotational speeds of 5000, 10000, 15000, and 20000 rpm was used as the basis of the catching mass. The resulting charge had a particle size of approximately 2 μm, which made it possible to intensify the interaction between CaO and Pt by increasing the specific surface area. By studying the effect of temperature in the range of 400-800 °C on the efficiency of platinum particle capture, the optimal location of the capture mass was determined in the immediate vicinity of the catalyst nets. This article reveals the theoretical mechanism of platinum capture, which involves the formation of a CaO·PtO₂ compound on the surface of the collecting mass. It has been found that to increase the strength of the adsorption material, it is proposed to introduce a composition of CaO, CaCl₂, and CaO·Al₂O₃ in the amount of 10% by weight of the main component into the charge. A burning additive, charcoal, was used to obtain the porous structure of the material. The developed adsorption mass can be used to capture platinum during nitric acid production for recycling.

Key words: platinum catalyst, catalytic oxidation, selectivity, regeneration, oxide adsorbent, disintegration.

ТРАНСПОРТ

УДК 621.341

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/35>**Бойко С.М.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

Котов О.Б.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Райда І.М.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Лебідь Г.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Бойко О.С.

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

Дсрябіна І.О.

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

ПЕРСПЕКТИВИ ОРГАНІЗАЦІЇ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛІВ В АСПЕКТІ РЕНОВАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ АЕРОДРОМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Стаття присвячена питанням розробки рекомендацій організації мультимодальних транспортних вузлів в аспекті реновації об'єктів аеродромної інфраструктури. У статті визначено основні вимоги, що пред'являються до транспортних засобів та систем, котрі мають обслуговувати пасажиропотік з аеропорту до населеного пункту. Акцентовано увагу на те, що вибір видів транспорту залежить від багатьох факторів та повинен виконуватися в залежності від особливостей розташування аеропорту та пасажиропотоку. У статті, особлива увага привертається до застосування наземних видів транспорту для перевезення авіапасажирів та персоналу аеропорту, серед яких не останнє місце займають автобуси, таксі, персональний автомобільний транспорт. Також, у статті проаналізовано сучасні особливості та можливості взаємодії різних видів сучасного експлуатованого транспорту в умовах транспортного мультимодального вузла аеропорту для перевезення авіапасажирів. Тож, аеропорти залишаються важливі тими транспортними мультимодальними вузлами, котрі потребують постійного розвитку та вдосконалення транспортної взаємодії з іншими вокзалами функціонуючих видів транспорту. З поміж іншого слід зазначити, що велика кількість аеропортів розвинених країнах світу, проектування або реконструкція яких було завершено в минулому столітті, на сьогодні експлуатується в тісній взаємодії з існуючою транспортною інфраструктурою. Запропоновано рекомендації щодо організації мультимодальних транспортних вузлів в аспекті реновації об'єктів аеродромної інфраструктури можуть бути корисні для оптимізації пасажиропотоків авіаоператорів від аеропортів до кінцевих точок маршрутів авіапасажирів. Такий підхід дасть можливість інтегрувати нові види транспорту до перевезення авіапасажирів та оптимізувати існуючі види транспорту у транспортних зв'язках та взаємодіях між різними видами транспорту, що буде спрямовано на підвищення ефективності та швидкості перевезень.

Ключові слова: авіаційний транспорт, аеропорти, взаємодія видів транспорту, наземний транспорт, водний транспорт, залізничний транспорт.

Постановка проблеми. У ранній період розвитку авіації проїзд в аеропорт не представляв серйозні проблеми для авіапасажирів. Типовий аеропорт початку минулого століття проектувався на околиці населених пунктів. Відносно висока вартість польоту вказувала на те що авіаційним транспортом користувалась невелика частина населення порівнянню з великою кількістю пасажирів що користувалися залізничним сполученням.

Тож частина людей могла дістатися до аеропорту на власному автомобілі, оскільки інтенсивність руху автотранспорту на той час була невеликою [1].

У другій половині XX століття на проїзд в аеропорти сильно впливало загальне прагнення придбати автомобіль та зниження реальної вартості авіаційного транспорту що було спровоковане провадженням покращених типів повітряних суден. На сьогоднішній день приїзд пасажирів в аеропорт включає в себе поїздку або на автомобілі чи автобусі по перевантаженим висококласним дорогам з інтенсивністю руху автотранспорту котра в багато разів перевищує рух минулих десятиліть [2].

Таким чином, при розробці транспортної системи аеропорта не можна обмежуватися тільки вирішенням зв'язку від міста до аеровокзала, оскільки необхідно також враховувати можливість проїзду авіапасажирів із міста та передмістя до автомагістралі що прямує в аеропорт. Між тим, в період проектування аеропорта відомості про майбутні потоки авіапасажирів в межах міста зазвичай відсутні що ускладнює рішення системи під'їзних шляхів в цілому. Навіть при поїздки авіапасажирів в аеропорт організація їх переміщення на аеровокзалі на пероні та й в самому аеровокзалі в процесі обслуговування повинна бути комплексною та включати взаємозв'язки з метою забезпечення чіткої взаємодії різних видів транспорту котрий обслуговує авіаційний транспорт [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз попередніх досліджень вказує, що економія часу отримана внаслідок провадження реактивних повітряних суден частково чи повністю зводиться до нуля при збільшенні часу на проїзд наземних транспортних засобів і часу обслуговування на аеровокзалі. Таким чином, неефективний транспортний зв'язок суттєво впливає на загальний час котрий витрачає пасажир на переміщення особливо при польотах на короткі відстані для яких відношення часу поїздки в аеропорт до

сумарного часу поїздки є високим. Скорочення часу доставки пасажирів в аеропорт в обидва напрямки і є на сьогоднішній день суттєвою науково-практичною проблемою що потребує вирішення [4-11].

Між тим, питання організації мультимодальних транспортних вузлів в аспекті реновації об'єктів аеродромної інфраструктури залишається актуальним.

Постановка завдання. Метою статті є розробка рекомендацій щодо організації мультимодальних транспортних вузлів в аспекті реновації об'єктів аеродромної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. При розробці проекту системи під'їзних шляхів зазвичай вирішують наступні задачі. Першою з них є збір обслуговування пасажирів та обробка вантажів в центральній частині міста та других центрах пасажиропотоків. Другою задачею є організація руху пасажирів і вантажів в аеропорт наземним або повітряним транспортом. Третьою задачею є розподілення під'їзду пасажирського та службового транспорту до аеровокзала та місць стоянок.

При проектуванні систем під'їзних шляхів слід враховувати той факт, що під'їзний шлях до аеропорту призначений не тільки для авіапасажирів оскільки в багатьох аеропортах авіапасажирів складають меншість.

Склад пасажиропотоку в аеропорту різноманітний і під'їзний шлях повинен обслуговувати різні групи людей до яких входять авіапасажирів проважаючі та зустрічаючі, відвідувачі персоналу, котрий зайнятий доставкою повітряних вантажів персонал аеропорту.

За розподілу пасажирів по окремим групам в різних аеропортах відносно до залежності таких факторів як клас аеропорту та його значення та місце положення а також кількість та габарити повітряних суден виконується в залежності до вказаних факторів. Також немаловажним фактором у організації діяльності аеропорту є дотримання питань комфорту, швидкості перевезення авіапасажирів, екологічність аеропортової інфраструктури, ефективність взаємодії видів транспорту у мультимодальному транспортному вузлі аеропорту (рис. 1).

Як приклад, у кінці XX століття великих аеропортах світу було задіяно велика кількість працівників, що відповідало населенню невеликого міста. Відповідна кількість службових поїздок еквівалентна поїздка ділової частини міста з населенням рівнем приблизно чверті мільйона людей

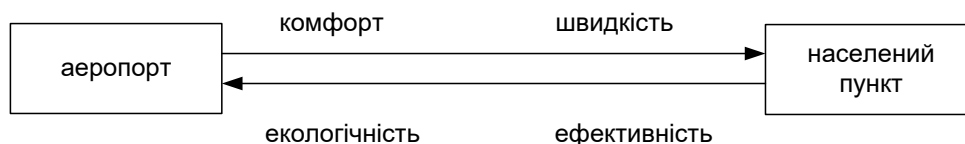


Рис. 1. Схема взаємодії видів транспорту у мультимодальному транспортному вузлі аеропорту

тому при виборі міста локації аеропорта одним з основних факторів, який необхідно враховувати є можливість забезпечувати найкращий транспортні розв'язки і зменшення під'їзних шляхів з урахування їх ефективного використання в умовах потужного пасажиропотоку.

Таким чином схема руху пасажирів в аеропорту або із аеропорта залежить від наявності у них автомобілів. Кількість пасажирів котрі приїжджають в аеропорт приватним автотранспортом як правило складає більше 70%. Інші пасажирів користуються громадським транспортом в якості якого використовуються спеціальні автомобілі чи автобуси. Між тим забезпечення автомобільної доставки пасажирів великих аеропортах потребує великих економічних затрат пов'язаних із будівництвом відповідно класу автомобільних доріг, тож враховуючи цей факт у великих аеропортах для перевезення пасажирів в аеропорт і назад повинні бути попередньо розглянути варіанти використання різних видів транспорту котрі забезпечують великі пасажиропотоки.

На сьогоднішній день прогнозування у часі об'ємів пасажиропотоків визначається по даним існуючих маршрутів початкових та кінцевих пунктах маршруту. А за відсутності надійних даних прогнозованих об'ємів перевезень зазвичай визначаються з допомогою побудови узагальнених моделей перевезення між навчальними та кінцевими пунктами.

Вибір типу системи під'їзних шляхів і їх оцінку виконують з урахуванням деяких умов відносно характеру і місця розташування проєктованих вокзалів.

Наступний етап характеризується прогнозуванням кількості можливих виборів видів транспорту з точністю, котра дозволяє оцінити його експлуатаційні характеристики а саме вартість і загальний рівень обслуговування. На цій стадії можуть бути перераховані та проаналізовані можливі негативні наслідки, що виникають зазвичай соціально-економічній сфері внаслідок використання окремих видів транспорту. Одним із таких глобальних аргументів, котрі мали вплив на побудову аеровокзалу в минулому була недостатня припускна спроможність існуючої автодороги, котра не дозволяла забезпечувати додаткове збільшення інтенсивності руху та виявилася нефункціональною для подальшого розвитку та реконструкції.

На сьогоднішній день, для поєднання пасажиропотоків населених пунктів з аеропортами у світі використовуються такі види транспорту як водний транспорт, спеціалізовані підвісні дороги, міський транспорт, швидкісний наземний транспорт, залізничний транспорт (рис. 2).

Як відомо, для перевезення пасажирів проєктують нові види транспорту або використовують існуючі. На сьогоднішній день, найбільшого поширення серед інших видів транспорту отри-

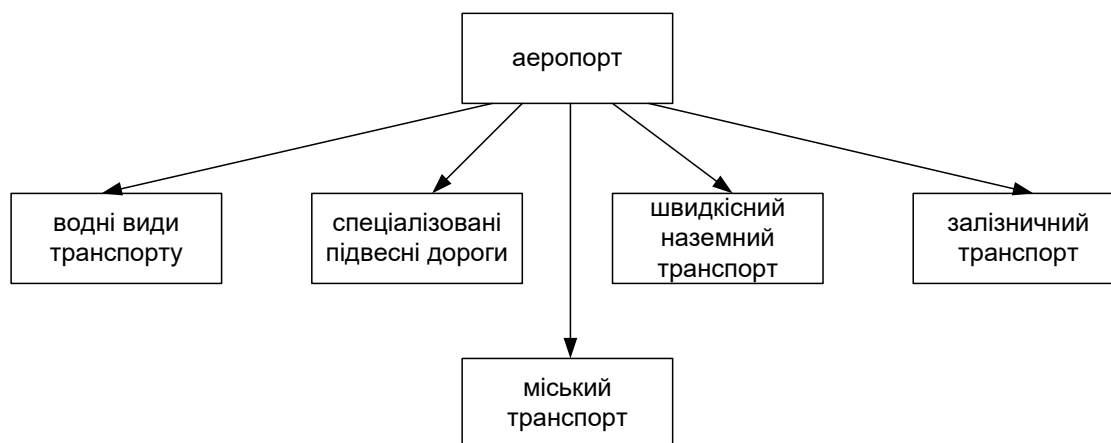


Рис. 2. Види транспорту для поєднання пасажиропотоків населених пунктів з аеропортами

мав автомобільний транспорт. Слід зазначити що пасажирів доволі часто використовують такі для поїздок в аеропорти що дає можливість прямої доставки пасажирів з навчального пункту пункт призначення та дозволяє забезпечити високий рівень обслуговування пасажирів на цьому виді транспорту.

З-поміж іншого слід зазначити, що місцевий автобус в деяких населених пунктах може виконувати перевезення пасажирів до аеропорту у зв'язку з тим, що присутній під'їзд до аеропорту звичайними місцевими автобусами, котрий входить до схеми а громадського транспорту. Цей вид транспорту є дуже дешевим і мало впливає на виникнення пробок на дорогах оскільки посадка та висадка пасажирів виконується на спеціально відведених ділянках з уширенням проїжджої частини. Тож, будуючи зв'язаним з місцевим транспортом мережею автобус може забезпечити високий рівень комфорту для робітників аеропорту.

Одним з найбільш розповсюджених видів транспорту, що застосовується для поєднання населених пунктів з аеропортом є спеціальний автобус котрий дає можливість поєднання певних районів з обмеженою кількістю пасажирів зазвичай розташована в центральній частині населених пунктів.

Іншим іншим видом транспорту є в залізничний транспорт який може обслуговувати певну кількість аеропортів. На сьогоднішній день залізничним транспортом обслуговується невелика кількість аеропортів. Як правило під'їзні залізничні дороги включають спеціальні короткі відгалудження для поєднання із існуючою залізною дорогою, що дає можливість зменшення вартості проїзду по дорозі. Цей вид транспорту не чутливий до заторів в порівнянні з автомобільним транспортом що в свою чергу впливає на збільшення його надійності і зменшення затримок у часі.

На сьогоднішній день самим швидким транспортом для доставки пасажирів в аеропорт є апарати вертикального зльоту і посадки що набули

широкого розповсюдження всередині минулого століття в США. Досвід використання вертольотів для зв'язку з аеропортом показує, що їх успішному застосуванню сприяють такі умови як наявність суттєвих фізичних завад для наземних транспортних засобів та наявність поблизу основного транспортного вузла ряду аеропортів.

З-поміж, іншого слід зазначити що при розташуванні аеропорта поблизу водних транспортних шляхів для перевезення пасажирів з аероказалу застосовують водні види транспорту.

Між тим, слід враховувати той факт, що ні один із видів існуючого транспорту без попереднього обґрунтування не приймається за оптимальний у зв'язку з чим доцільно розглядати деякі переваги і недоліки різних видів транспорту, котрі використовуються в проекті під'їзних шляхів аеродромної інфраструктури.

На основі використання розподіляючих моделей або оброблених даних існуючих спостережень чи синтезованих досліджень для вибору конкуруючих видів транспорту може бути виконана оцінка прийнятих моделей термінів поїздок і соціально-економічних значеннях.

Самий конкурентоздатний вид транспорту або взаємодії декількох видів транспорту приймають для подальшої детальної розробки та проектування. Якщо поєднання видів транспорту не дозволяє визначити найбільш придатний необхідно виконати перерахунок, наприклад змінивши прийнятну систему під'їзних шляхів з аероказалу і відповідні характеристики видів транспорту. При певних умовах виходить що як мінімум одне оптимальне рішення задовольняє прийнятим критеріям, а у випадку отримання ряду рішень за розрахунком приймають найкраще з них.

Велика кількість аеропортів розвинених країн світу, проектування або реконструкція яких було завершено в минулому столітті, на сьогодні експлуатується в тісній взаємодії з існуючою транспортною інфраструктурою. Безумовно на перспективу буде потреба у побудові нових аеро-

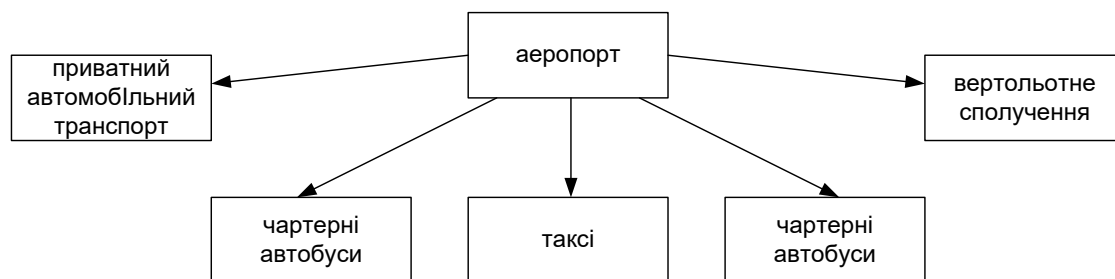


Рис. 3. Популярні варіанти перевезення авіапасажирів

портів для великих міст де відбувається зростання кількості населення. В ряді інших населених пунктів пропускна спроможність аеропортів скоріш за все збільшиться за рахунок реконструкції існуючих інфраструктурних об'єктів що буде більш ефективно за побудови нових на незадіяних ділянках. Вказані твердження стосуються як розвинених країн світу, де густина населення висока, так і країн, що розвиваються, де адміністрації аеропортів приходиться мати серйозні проблеми щодо соціального напруження у зв'язку з впливом на навколишнє середовище нових аеропортів. Тому більшість проблем пов'язаних перед існую-

чими аеропортами будуть мати місце і в майбутньому.

Висновки. В даній роботі проаналізовано сучасні особливості та можливості взаємодії різних видів сучасного експлуатованого транспорту в умовах транспортного мультимодального вузла аеропорту для перевезення авіапасажирів.

Розроблені та запропоновані рекомендації щодо організації мультимодальних транспортних вузлів в аспекті реновації об'єктів аеродромної інфраструктури можуть бути корисні для оптимізації пасажиропотоків авіаоператорів від аеропортів до кінцевих точок маршрутів авіапасажирів.

Список літератури:

1. ICAO Strategic Objectives [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.icao.int/about-icao/Pages/Strategic-Objectives>.
2. Крихтіна Ю. О. Державна політика розвитку транспортної галузі України: теорія, методологія, практика: монографія. Харків: «Діса плюс», 2022. 336 с.
3. Norman J. Ashford, Saleh Mumayiz, Paul H. Wright. Airport engineering: planning, design and development of 21st century airports. 4th edition. 2011. 769 p.
4. Соколова О. Є. Концептуальні засади формування мультимодальної системи перевезення вантажів. Наукоємні технології. 2014. № 1. С. 114-118.
5. Ломотько Д. В., Філіпський О. В., Кравченко Д. М. Удосконалення роботи транспортно-пересадочних вузлів під час мультимодальних пасажирських перевезеннях за участю залізниць та автотранспорту. Наукові праці ВНТУ. 2019. № 4. С. 1-12.
6. Разумова К. М., Кириленко О. М., Новак В. О., Зарубінська І. Б., Мостенська Т. Л. Транспортна політика Європейського Союзу і України. К: Кондор-Видавництво, 2021. 57 с.
7. Steadie Seifi M., Dellaert N. P., Nuijten W., Van Woensel T., & Raoufi R. Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 2014. 233 (1), pp. 1-15.
8. Григоров О. М. Міжнародно-правові засади регулювання відносин у сфері цивільної авіації: становлення та розвиток: Монографія. Одеса: Фенікс. 2020. 350с.
9. Razumova K., Kyrylenko O., Zarubinska I., Novak V., Guryina G., Ways of realization Ukraine's transport system to the EU. *Collective monograph. Modern aspects of science. 11-th volume of the international collective monograph. 6. International Economics*. Czech Republic. 2021, pp.151-160.
10. Kotov O., Obidin D., Boiko S., Pavlovskiy M., Nozhnova M. The Problems of Ensuring the Efficiency and Competitiveness of the Ukrainian Transport Industry to Meet the Modern Challenges and Threats. *Khazar Journal of Humanities and Social Sciences (Special Issue)*: Vol. 26 No. 3 (2023), pp. 48-63.
11. Бойко С. М., Котов О. Б., Лапіна О. С., Реута А. В., Гвоздік С. Д., Дерябіна І. О. Особливості організації заходів безпеки в мультимодальних транспортних вузлах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Сер.: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 3. С. 20-24.

Boiko S.M., Kotov O.B., Raida I.M., Lebid H.O., Boiko O.S., Deryabina I.O. PROSPECTS FOR THE ORGANIZATION OF MULTIMODAL TRANSPORT NODES IN THE ASPECT OF AIRPORT INFRASTRUCTURE RENOVATION

The article is devoted to the development of recommendations for the organization of multimodal transport hubs in terms of the renovation of airport infrastructure facilities. The article defines the main requirements for vehicles and systems that must serve passenger traffic from the airport to the settlement. It is emphasized that the choice of transport modes depends on many factors and must be carried out depending on the characteristics of the airport location and passenger traffic. The article draws special attention to the use of ground transport modes for the transportation of air passengers and airport personnel, among which buses, taxis, and personal automobile transport occupy not the last place. The article also analyzes the current features and possibilities of interaction of various types of modern operated transport in the conditions of an airport multimodal transport hub for the transportation of air passengers. Therefore, airports remain important multimodal transport hubs that require constant development and improvement of transport interaction with other stations of operating modes of transport. Among other things, it should be noted that a large number of airports in developed

countries of the world, the design or reconstruction of which was completed in the last century, are currently operated in close interaction with the existing transport infrastructure. Recommendations for the organization of multimodal transport hubs in the aspect of the renovation of airfield infrastructure facilities are proposed and may be useful for optimizing passenger flows of air operators from airports to the final points of air passenger routes. Such an approach will make it possible to integrate new modes of transport into the transportation of air passengers and optimize existing modes of transport in transport connections and interactions between different modes of transport, which will be aimed at increasing the efficiency and speed of transportation.

Key words: *air transport, airports, interaction of transport modes, land transport, water transport, rail transport.*

УДК 656.614.3
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/36>

Вишневський Д.О.

Одеський національний морський університет

Вишневська О.Д.

Одеський національний морський університет

СПЕЦИФІКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФЛОТУ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У статті розглянуто специфіку роботи світового торгівельного флоту. Наголошено на важливості забезпечення безперервності транспортного процесу. Досліджено сукупність факторів, що здійснюють вплив на роботу флоту, при організації вантажних перевезень. Виділено групи факторів, досліджено їх відмінності та характер впливу на роботу суден. Встановлено, що це дозволить своєчасно усунути небажані наслідки якщо якісь із факторів, через свою специфіку, може бути важко спрогнозувати. У першій групі було розглянуто фактори зовнішнього середовища, які впливають на роботу флоту. Другу групу складають фактори, які безпосередньо визначають характер функціонування транспортного процесу. Серед факторів зовнішнього середовища було виділено економічні, технічні, політичні та природні, а також розглянуто характер їх впливу. Серед факторів, що являють собою структурні елементи транспортного процесу, було виділено наступні: вантажопотоки, транспортна інфраструктура, флот, форми судноплавства та форми організації руху суден. Технічні фактори представлено різного роду обставинами, що впливають на роботу флоту, портів та перевантажувального обладнання. Відзначено, що політичні фактори включають в себе забастовки, бойові дії та обмежувальні заходи, що здатні вплинути на процес перевезень. Групу природних факторів представлено переважно різними гідрометеорологічними умовами. Розглянуто економічні чинники, що впливають на стан фрахтового ринку, структуру, напрями перевезень. Особливо відзначено роль чинника структури вантажопотоків. Чинники пов'язані з суміжними видами транспорту здатні вплинути на обсяг перевезень та терміни обслуговування суден в портах. Було розглянуто різні види вантажопотоків, серед яких зовнішні та внутрішні, прямі та розбіжні, односторонні двосторонні тощо. Серед різних елементів транспортної інфраструктури особливо було відзначено порти та судноремонтні підприємства. Крім того, було досліджено основні ознаки регулярних і нерегулярних форм руху суден. Було відзначено переваги регулярних форм руху суден над нерегулярними.

Ключові слова: організація вантажних перевезень, вантажопотоки, фрахтовий ринок, форми судноплавства, транспортна інфраструктура, перевантажувальне обладнання.

Постановка проблеми. Для ефективної організації вантажних перевезень необхідно забезпечити стійкість транспортного процесу перевезення в конкурентному середовищі, що динамічно змінюється. Виконання цього завдання вимагає безперервного утримання заданого рівня всіх технологічних процесів, за умови постійного впливу на них різних чинників зовнішнього середовища.

У силу своєї специфіки деякі фактори можуть мати випадковий характер, внаслідок чого не можуть бути заздалегідь передбачені функцією планування. Саме тому важливо також враховувати даний аспект та мати можливість своєчасно ліквідувати різноманітні наслідки від порушення цілісності розкладів та відхилень від графіків роботи суден.

Таким чином необхідно своєчасно ідентифікувати всі можливі фактори, які можуть вплинути на процес організації вантажних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Організація транспортного процесу в сучасному конкурентному середовищі потребує вивчення широкого спектру питань та різних факторів, які впливають на цей процес. Як у вітчизняній, так і в іноземній літературі розгляду даних факторів приділяється багато уваги.

Так, аналіз чинного стану транспортної галузі, питання інновацій, перспективних напрямів розвитку, основи теорії транспортних процесів та систем здійснювалися у роботах [1-4, 9-14].

У роботах [6, 7] було досліджено різні умови експлуатації морських транспортних суден.

Питання організації та оптимізації вантажних перевезень в сучасних умовах розглядалися у роботах [5, 8, 16, 17].

Постановка завдання. Метою даної роботи є виявлення ключових груп факторів, здатних

вплинути на транспортний процес при організації вантажних перевезень.

Виклад основного матеріалу дослідження. При організації вантажних перевезень, на роботу суден впливає велика кількість різних факторів. Серед даних факторів можна виділити такі, що пов'язані безпосередньо з внутрішніми структурними елементами галузі, так і такі, що відносяться до елементів зовнішнього середовища. Наочне зображення складу факторів, що впливають на процес перевезень, можна побачити на рисунку 1.

Вплив факторів зовнішнього середовища (рис. 2) здатний призвести до відхилень від заданого плану роботи флоту. Серед цих факторів можна виділити кілька груп, серед яких економічні, технічні, політичні та природні.

Серед економічних факторів можна виділити коливання кон'юнктури фрахтового ринку, зміни структури та напрямів вантажопотоків, виникнення незапланованих торговельних угод.

До технічних факторів можна віднести різні обставини, здатні вплинути на роботу портів, перевантажувальних комплексів, водних шляхів. До них відносяться також різні аварійні ситуації на флоті та об'єктах транспортної інфраструктури, а також затримки суден на ходу та в портах, викликані технічними причинами.

Політичні фактори включають різні події і рішення, що здатні вплинути на хід протікання перевезень і призвести до зміни структури вантажопотоків. До подібних факторів можна віднести страйки, обмеження, санкції, піратство, військові дії і т.д.

Природні фактори включають вплив різних гідрометеорологічних умов на процес роботи флоту і перевезення вантажів. До подібних факторів можна віднести хвилювання, вітри, течії, суворі льодові умови.

При організації вантажних перевезень важливо розділяти фактори, які безпосередньо визначають характер протікання перевізного процесу і структури вантажопотоків (рис. 3), а також фактори зовнішнього середовища, які вносять корективи у процес перевезень, що вже сформувався.

Для організації вантажних перевезень фактор структури вантажопотоків безумовно є визначальним. Саме структура вантажопотоків вкаже на те, які обсяги необхідно перевозити і який обсяг тоннажу потрібно задіяти для їх освоєння. Структура вантажопотоків дозволить також визначитися з типами суден, які необхідно застосувати.

Морські перевезення здійснюються там, де є необхідність переміщення вантажів та пасажирів морськими шляхами. Основа морських перевезень – це вантажопотоки та пасажиропотоки.

Матеріально-технічну базу складають морські шляхи, порти та транспортний флот. Кожен морський порт пов'язаний різними судноплавними лініями з багатьма іншими портами і входить до складу не однієї, а кількох морських комунікацій.

Основу матеріально-технічної бази морського транспорту становлять морські судна різної спеціалізації та призначення. Світовий морський транспортний флот представлений різними типами морських суден різної вантажопідйомності, які відрізняються конструктивними особливостями та швидкісними характеристиками.

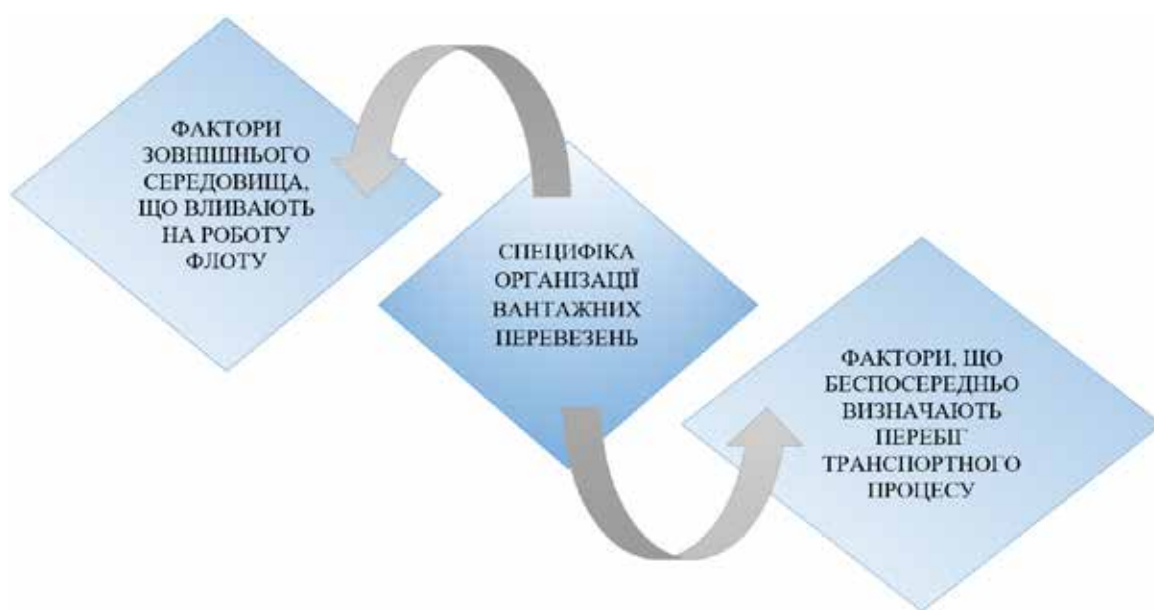


Рис. 1. Фактори, що впливають на організацію вантажних перевезень



Рис. 2. Фактори зовнішнього середовища, що впливають на організацію вантажних перевезень

Фактори, що пов'язані із суміжними видами транспорту або морським транспортом іноземних країн, можуть спричинити переформатування структури та обсягів вантажопотоків і призвести до змін у термінах обслуговування суден у морських торговельних портах. Наочне зображення складу світового тоннажу за типами суден можна побачити на рисунку 4.

Вантажопотоки становлять економічну основу розвитку та організації роботи морського транспорту. Провізна здатність флоту і пропускна спроможність портів залежить від раціонального районування морських вантажопотоків, тобто як вони розподілені між морськими басейнами і між портами кожного басейну.

Серед вантажопотоків можна виділити такі як зовнішні вантажопотоки і внутрішні, прямі та розбіжні і т.д. Можуть бути односторонніми та двосторонніми, постійними та сезонними. Також вантажопотоки характеризується кількістю, структурою, обсягом, напрямом та часом переміщення.

У контексті розгляду вантажопотоків важливо також врахувати і роль вантажовласників, оскільки вони можуть зажадати змін у якості перевезення, додаткових видів обслуговування або змін у термінах відправки.

При розгляді транспортної інфраструктури, як для морського транспорту, безумовно, головним фактором є стан портів. Це включає наявність перевантажувального обладнання належної якості та у потрібній кількості, складських площ, забезпеченість працівниками належної кваліфікації, стану акваторії та підхідних каналів, а також забезпеченість судно-ремонтними підприємствами.



Рис. 3. Структурні елементи системи, що безпосередньо визначають характер транспортного процесу

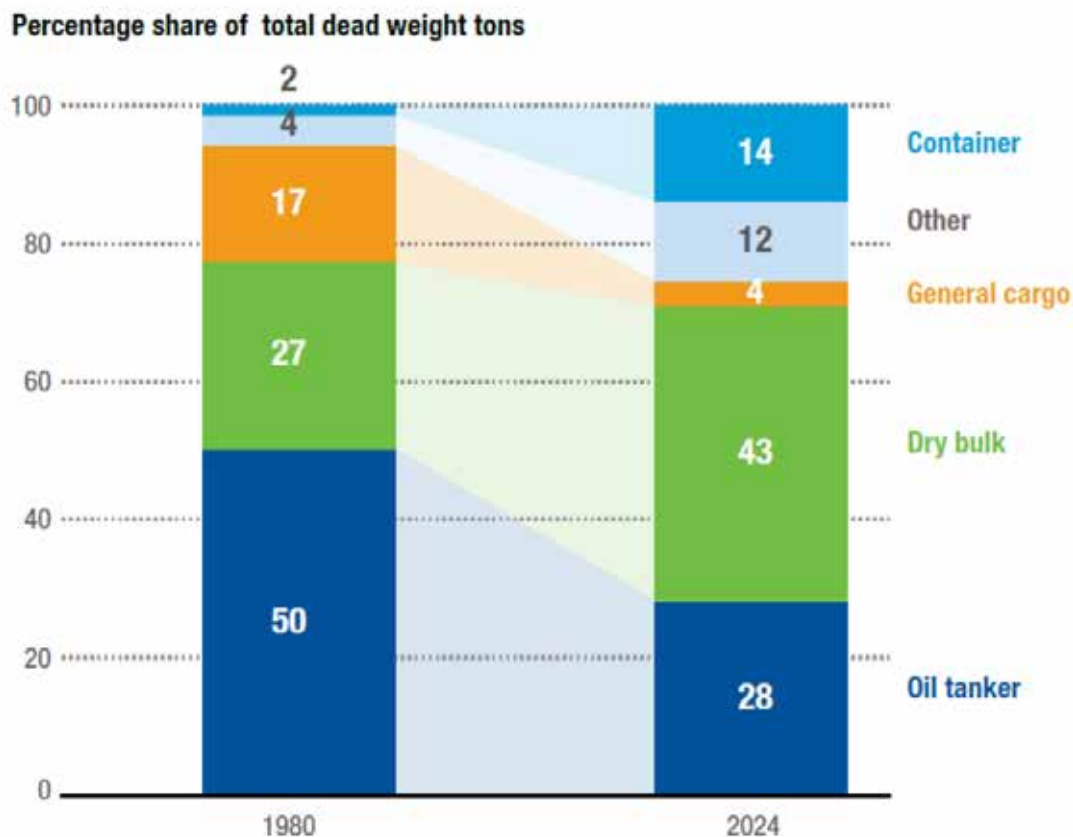
Форми судноплавства представлені лінійною та трамповою формами судноплавства. Що ж до форм руху, то існують регулярні і нерегулярні форми руху суден. Регулярні форми руху суден представлені лінійним плаванням та роботою суден послідовними рейсами. Нерегулярна форма руху суден являє собою рейсове плавання.

До основних ознак регулярних форм руху флоту відносять: визначений і постійний напрям перевезень із закріпленням тоннажу і його роботою за встановленою схемою руху, із дотриманням певного режиму руху, з достатнім ступенем точності.

Регулярні форми руху суден мають ряд переваг у порівнянні з нерегулярним плаванням. Насамперед, за регулярного руху суден спрощується оперативне планування роботи флоту. При закріпленні суден на певних напрямках перевезень можливо провести раціональний відбір для цих напрямів з урахуванням експлуатаційно-технічних та економічних показників.

Регулярні форми руху суден дозволяють здійснити вантажну спеціалізацію флоту та портів. Повний вираз така спеціалізація отримує при перевезеннях масових вантажів. При змішаному складі вантажів, що перевозяться, їх номенклатура встановлюється у відомих межах, що дозволяє відібрати судна за їх конструктивними особливостями, з урахуванням транспортної характеристики вантажу.

При регулярних формах руху флоту, судна відвідують одні й самі порти, судовий екіпаж і судова адміністрація мають можливість вивчити роботу портів і навігаційні особливості плавання. Застосування цього підходу сприяє підвищенню



Source: UNCTAD calculations, based on data from table II.1 of this report and UNCTAD statistics.

Рис. 4. Частки тоннажу різних типів суден у світовому флоті у 1980 та 2024 роках [4]

безпеки судноводіння та скорочення ходового та стоянкового часу роботи суден. У той самий час працівники портів регулярно обробляючи одні й самі судна мають можливість вивчити їх конструктивні особливості і пристосуватися до виконання вантажно-розвантажувальних робіт.

Застосування регулярних форм руху суден підвищує ритмічність перевезення вантажів і скорочує їх терміни доставки.

Регулярні форми організації руху суден мають такі переваги: вони забезпечують підвищення провізної спроможності флоту, знижують експлуатаційні витрат. Найважливішою умовою підвищення ефективності роботи флоту є переведення найбільшої частини суден на регулярні форми руху.

Нерегулярне або рейсове плавання здійснюється для виконання перевезень які мають епізодичний або одиничний характер, а також для перевезень, які виходять за межі стійкої частини вантажопотоку.

Судна, що здійснюють нерегулярне рейсове плавання, не закріплюються на тривалий період для роботи між певними портами – вони вико-

нують рейси за рейсовими планами. Також судна рейсового плавання використовують як судна субституту регулярних форм руху флоту.

Висновки. Судноплавна галузь безперервно розвивається, проходить через етапи зростання та падіння, впроваджуються нові технології, змінюється кон'юнктура фрахтового ринку, структура, обсяги та напрямки перевезень. Зважаючи на те, що галузь перебуває в постійній динаміці, як склад так і роль факторів, що на неї впливають, також піддаються різним змінам. У той час як ступінь впливу одних факторів може не змінюватися протягом досить тривалого часу, роль інших факторів здатна коригуватися досить часто.

Таким чином, дослідження, які проводяться на цьому напрямі, як і раніше, зберігають свою актуальність. Сучасна судноплавна галузь являє собою висококонкурентне середовище, що потребує постійного моніторингу і своєчасного врахування великої кількості різноманітних факторів. Від того, наскільки глибоко будуть досліджені ці питання та наскільки вірні будуть зроблені висновки залежить ефективність учасників на ринку перевезень.

Список літератури:

1. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Нагальні проблеми і перспективи розвитку судноплавної галузі. *The XXVI International Science Conference «Topical issues of practice and science»*. May 18 – 21, 2021. London, Great Britain. p.718-722.
2. Вишневський Д.О. Методичні основи організації роботи універсальних суден на міжнародних лініях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01, Одес. нац. мор. ун-т. Одеса, 2016. 21 с.
3. *Review of maritime transport 2024*. URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024>. (дата звернення 20.01.2025).
4. *BRS Group. Shipping and shipbuilding markets. Annual Review 2024*. URL: <https://www.brsbrokers.com/annualreview2024.html>. (дата звернення 18.01.2025).
5. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Критерії відбору альтернативних варіантів доставки зовнішньоторгівельних вантажів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 4. С. 262-264. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2017_4_52.
6. Лапкін О. І. Визначення варіанту експлуатації суден обмежених районів плавання в регіоні Чорного та Середземного морів. *Вісник Одеського національного морського університету. Збірник наукових праць*. Випуск 4(46). – Одеса: ОНМУ, 2015. – С. 86 – 97.
7. Lapkin A. The Organization of Consecutive Voyages Operation by National Shipowners. *Вісник Одеського державного морського університету: Зб. наук. пр. Випуск 5*. – Одеса: ОДМУ, 2000. – С. 182-191.
8. Вишневський Д. О., Вишневська О.Д. Сучасні підходи в організації вантажних перевезень на транспорті, як невід’ємний фактор розвитку регіону. *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наукових праць*, 2023. № 1 (68). – С. 147-155.
9. Д. О. Вишневський. О. Д. Вишневська. Склад факторів конкурентного середовища у морській судноплавній галузі. Матеріали V Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і TE Marine Power Plants & Operation (MPP&O-2024), м. Одеса, 5 березня 2024 р. Одеський національний морський університет. Одеса, 2024 – С. 283-288. Режим доступу: <https://2024.depas.od.ua/>
10. Melnyk, O., Shcherbina, O., Mykhailova, I., Obnyavko, T., & Korobko, T. (2023). FOCUSED RESEARCH ON TECHNOLOGICAL INNOVATIONS IN SHIPPING INDUSTRY: REVIEW AND PROSPECTS. *Transport Development*, (1(16)), 164-174. <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.13>.
11. Вишневський Д. О. Урахування можливого негативного впливу виробничих та комерційних факторів в процесах управління роботою суден. *Вісник ОНМУ: зб. наукових праць*, 2018. – Вип 2 (55). – С. 120-126.
12. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Фактори успішності функціонування підприємства морського транспорту. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73). № 2. С. 106-114. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/19>.
13. Кириллова О.В. Теоретичні основи управління роботою флоту у транспортно-технологічних системах: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.01 – транспортні системи; Одеський національний морський університет. Одеса, 2017. 470 с.
14. Давідіч Ю.О., Фалецька Г.І., Ольхова М.В. Ефективність транспорту. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. 74 с.
15. Основи теорії транспортних процесів та систем / А.І. Панченко та ін. Мелітополь : Люкс, 2021. 160 с.
16. Організація транспортного процесу та управління роботою флоту на ринку міжнародного судноплавства. Ідентифікація невизначеності у системі доставки вантажів за участю морського транспорту: моногр. Ч. 2 / авт. кол.: О. Г. Шибаєв, Ю. В. Михайлова, О. В. Акімова [та ін.]. – Одеса: КУПРИЕНКО СВ, 2017. – С. 52-56.
17. Прокудін Г. С. Моделі та методи оптимізації вантажних перевезень в транспортних системах: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.22.20. Національний транспортний університет. – К., 2009. – 44с. Режим доступу: <http://www.nbuv.gov.ua/ard/2009/09pgspts.zip>.

Vyshnevskiy D.O., Vyshnevskaya O.D. SPECIFIS OF FLEET OPERATION WITHIN ORGANIZATION OF CARGO CARRIAGES

The article considers the specifics of the world merchant fleet. Importance of the transport process continuity was specified. The set of factors influencing the fleet operation during the organization of cargo transportation was studied. Groups of factors were identified, their differences and the nature of their influence on the ships operation were studied as well. It was determined, that this will allow to preemptively eliminate undesirable consequences if any of the factors, due to their specificity, may be hard to predict. The first group considers the factors of the external environment, influencing the fleet operation. The second group consists of factors

that directly determine the nature of the functioning of the transport process. Among the factors of the external environment, economic, technical, political and natural factors were identified, and the nature of their influence was considered. Among the factors representing the structural elements of the transport process, the following were identified: cargo flows, transport infrastructure, fleet, forms of shipping and forms of organization of ship traffic. Technical factors are represented by various conditions influencing the operation of the port fleet and cargo handling equipment. It was determined, that political factors include strikes, hostilities and restrictive measures that can affect the transportation process. The group of natural factors is represented mainly by different hydrometeorological conditions. Economic factors, that influence the state of the freight market, structure, and directions of transportation were determined. Specifically was noted the role of the cargo flow structure. Factors associated with related types of transport can affect the volume of carriages and the terms of service of ships in ports. Various types of cargo flows were considered, including external and internal, direct and diverging, one-way and two-way. Among the various elements of transport infrastructure, ports and ship repair enterprises were especially noted. In addition, the main features of regular and irregular forms of ship traffic were studied. The advantages of regular forms of traffic over irregular ones were also considered.

Key words: *organization of cargo carriages, cargo flows, freight market, forms of shipping, transport infrastructure, cargo handling gear.*

Войченко Т.О.Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій**Тришин В.В.**Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій**Рященко О.І.**Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій**Лісовський С.В.**Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ СУДЕН З НАПІВЗАНУРЮВАЛЬНИМИ ГВИНТАМИ

Метою роботи є дослідження проблем технічної експлуатації пропульсивних комплексів суден з напівзанурювальними гвинтами з подальшою побудовою діаграми «аналізу кореневих причин» (діаграми Ішикави). Поставлена мета досягається шляхом, по-перше, аналізу основних типів приводів маломірних швидкісних суден з точки зору їх розміщення, побудови, переваг та недоліків; по-друге, аналізу завантаженості суден із напівзанурювальними гвинтами з початку їх експлуатації; по-третє, шляхом аналізу процентного співвідношення характерних відмов і несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу швидкісних суден із напівзанурювальними гвинтами. Проведений аналіз основних типів приводів маломірних швидкісних суден дозволив встановити особливості побудови приводу та його позитивні та негативні сторони. Встановлено, що на кордоні води і повітря, де різко падає опір, привід Арнесона з напівзанурювальними гвинтами вважається найпоширенішим. Це забезпечує суттєве зростання швидкості і зниження витрати палива, зменшення осадки судна а також вирішення проблеми кавітації. Тому судна з напівзанурювальними гвинтами найширше застосовуються для виконання пасажирських перевезень і спеціальних завдань, пов'язаних з патрулюванням, охороною державного кордону, пошуком браконьєрів тощо. Результати аналізу показали, що середній час напрацювання їх не перевищує 50% від загального фонду робочого часу; основні режими роботи головного двигуна з використанням напівзанурювальних гвинтів складають близько 80% від загального часу роботи двигунів; тривалість завантаженості судів у літній період практично в 3 рази перевищує завантаженість у зимовий період та найбільший процент несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу мають несправності системи гідроуправління. Найважливішим результатом досліджень є побудована діаграма Ішикави несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з напівзанурювальними гвинтами. Таким чином, розроблена діаграма надає можливість виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами та більш достеменно зрозуміти досліджуваний процес.

Ключові слова: експлуатація, судно, пропульсивний комплекс, частково занурені гвинти, аналіз, діаграма.

Постановка проблеми. На даний одними з найбільш ефективних малих суден (катерів) є судна з напівзанурювальними гвинтами, які отримали широке застосування як для виконання спеціальних завдань (патрулювання, охорона державного кордону, пошук браконьєрів), так і для пасажирських перевезень.

Напівзанурювальні гвинти є складовими елементами відповідного пропульсивного комплексу, до складу якого входять також головні двигуни, реверс-редуктори, торсіонні вали та інші елементи.

У процесі експлуатації цих швидкісних суден із напівзанурювальними гвинтами виникають

різноманітні відмови та несправності. Своєчасне виявлення відповідних несправностей є запорукою безпечного використання суден. У зв'язку з цим, як проектувальники, так й експлуатанти повинні знати причини виникнення несправностей і забезпечити такий комплекс технічних та організаційно-методичних заходів, який дозволить забезпечити або їх попередження або мінімізацію збитків від них. Тому дослідження проблем технічної експлуатації пропульсивних комплексів суден з напівзанурювальними гвинтами з подальшою побудовою відповідної діаграми «аналізу кореневих причин» є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням дослідження підходів щодо аналізу, проектування, побудови як швидкісних суден у цілому, так і їх пропульсивних комплексів присвячена значна кількість робіт, наприклад [1-8].

Так в роботі [1] визначено, що потреба у збільшенні швидкості середніх і великих суден ставить конструктора перед необхідністю вибору пропульсивних систем, які економічно задовольняють вимогам продуктивності на дедалі ширших експлуатаційних профілях. Сукупність гідродинамічних характеристик корпусу і рушіїв призводить до залежності швидкості від тяги для умов, в яких працює судно. Це співвідношення швидкості і тяги вимагає унікальних значень потужності і числа обертів для кожного типу і кількості рушіїв. Потужність і число обертів також чутливі до режиму роботи судна: постійна швидкість, прискорення до більшої швидкості або буксирування об'єкта. На більшості суден використовуються заглибні гребні гвинти з фіксованим кроком. Надводні гребні гвинти встановлюють на суднах, призначених для роботи на дуже високих швидкостях, а водометні рушії все частіше використовують на більших суднах із високошвидкісним профілем роботи. У цій статті розглядаються співвідношення гальмівної потужності (brake horsepower, BHP) і числа обертів гребного гвинта для вимог до швидкості судна на основі гідродинамічних характеристик трьох типів гребних гвинтів: заглибних, поверхневих і водометних. Наведено приклад прогнозованих характеристик судна щодо швидкості, потужності та числа обертів гребного гвинта, який охоплює характеристики двигуна і співвідношення BHP і числа обертів. Останній формат показує відмінності в потрібній потужності для трьох типів рушіїв на однокорпусному судні з урахуванням характеристик двигуна.

Наприклад, в роботі [2] було встановлено, що кавітація лопатей гребного гвинта на високошвидкісних суднах знижує ефективність роботи гвинта, оскільки призводить до ерозії та корозії лопатей, наведеної вібрації та шуму. Це призводить до неефективності гребного гвинта для підвісного двигуна і далі до розтрата пального, високого споживання енергії, шкідливих викидів та аварій на суднах. Дослідники показали, що пошкоджений гребний гвинт знижує продуктивність підвісної силової установки при передачі потужності для руху човна вперед. Такі характеристики гребного гвинта на відкритій воді успішно поліпшуються за допомогою рівняння Нав'є-Стокса з усередненням Рейнольдса (RANS), розв'язуваного за допомогою моделювання усталеного режиму в комерційному коді обчислювальної гідродинаміки (CFD) STAR-CCM+. У цьому дослідженні продуктивність гребного гвинта на відкритій воді оцінювали на основі впливу кількості лопатей і відношення кроку до діаметра (P/D). Чисельні результати показали, що зміна кількості лопатей призводить до збільшення ефективності більш ніж на 6% для гвинта з трьома лопатями, який мав найкращі характеристики гребного гвинта на відкритій воді. Результати також засвідчили, що відношення кроку до діаметра спричинило збільшення ефективності приблизно на 15% для найвищого P/D , що дорівнює 1,6. Це призвело до поліпшення характеристик підвісного морського гвинта, зменшення кавітації лопатей і зниження витрати палива.

В статті [3] представлено попередній аналіз, присвячений розробленню концепції нового швидкохідного судна, що відрізняється від типових морських суден, здатного розвивати дуже високу швидкість, незважаючи на свої основні розміри і водотоннажність. Зокрема, аналіз зосереджений на «глибоких V-подібних корпусах» загальною довжиною близько 40 м і діапазоном робочих швидкостей до 60 вузлів. На етапі проектування нового концептуального човна може виникнути безліч проблем. Крім класичних проблем проектування, добре вивчених у військово-морській архітектурі, виникають нові питання й особливості для такого типу дуже швидкісних суден. Одна з таких нових проблем пов'язана з оцінкою кривої опору на спокійній воді, для якої наявність даних і надійних методик має бути глибоко вивчена у зв'язку з аналізованими екстремальними умовами. Правильний прогноз опору є ключовим моментом, наприклад, для оцінювання встановленої на борту потужності,

необхідної для досягнення необхідної максимальної швидкості, і, зі свого боку, для оцінювання загальної ваги човна (оскільки головний двигун є одним із найвагоміших чинників) з урахуванням його сильного впливу на диференціювання човна, а отже, і на опір.

Постановка завдання. Мета роботи полягає у дослідженні проблем технічної експлуатації пропульсивних комплексів суден з напівзанурювальними гвинтами з подальшою побудовою відповідної діаграми «аналізу кореневих причин».

Виклад основного матеріалу. Основні типи приводів на сучасному ринку маломірних швидкісних суден наведено в табл. 1.

Привід Арнесона – найпопулярніший з напівзанурювальними гвинтами (НЗГ), що працюють не у воді, а на кордоні води і повітря, через що різко падає опір. Швидкість при цьому зростає на 15-30%, а витрата палива знижується. За рахунок того, що гвинти йдуть не під днище, а за корму, зменшується осадка судна. Крім того, знімається проблема кавітації, актуальна для повністю занурених гвинтів на швидкостях понад 40 вузлів: спочатку через високу швидкість обертання поверхня гвинта починає активно руйнуватися під впливом бульбашок, що утворюються в потоці води. Надалі, коли ці бульбашки, зливаючись, утворюють заповнені водяною парою каверни, упор знижується і ККД гвинта падає на 10-20%. Основним методом боротьби з кавітацією є збільшення площі лопатей і їхнє спеціальне профілювання – саме цим характеризуються напівзаглибні гвинти, які використовуються з приводом Арнесона. Нарешті, більша частина такого приводу перебуває за бортом, звільняючи дефіцитний простір усередині корпусу.

У зв'язку саме з цим судна з НЗГ отримали широке застосування як для виконання спеціальних завдань (патрулювання, охорона державного кордону, пошук браконьєрів), так і для пасажирських перевезень. На рис. 1 наведені основні функціональні вузли пропульсивного комплексу швидкісних судів на основі приводу Арнесона з НЗГ.

Особливістю таких судів є два режими руху: водотонажний (ВР) та глісуючий режим (ГР). Вихід судна на ГР відбувається при досягненні необхідних параметрів руху і зміни положення кута установки НЗГ.

Аналіз завантаженості суден із НЗГ з початку їх експлуатації (наприклад, Pershing 5X, Pershing 6X, Pershing 8X), показав, що середній час напрацювання не перевищує 50% від загального фонду

робочого часу (рис. 2). Це викликано, в першу чергу, як погодними умовами, так і існуючою складністю в організації сервісного обслуговування.

Дані за часом роботи головного двигуна (ГД) на різних режимах приводяться на діаграмі (рис. 3).

Основні режими роботи ГД від 1700 до 2400 хв⁻¹ складають близько 80% від загального часу роботи двигунів. Тривалість завантаженості суден у літній період практично в 3 рази вище завантаженості у зимовий період, що пов'язано з основним режимом їх роботи – перевезення пасажирів.

Для аналізу відмов та несправностей пропульсивного комплексу (ПК) із НЗГ виділимо основні функціональні вузли (див. рис. 1): корпус судна, головний двигун, еластична муфта, торсіонний вал, опорно-зав'язаний підшипник, гребний гвинт та система гідроправління.

На діаграмі (рис. 4) наведене процентне співвідношення характерних відмов і несправностей основних функціональних вузлів ПК швидкісних судів із НЗГ. Аналіз процентного співвідношення характерних відмов і несправностей основних функціональних вузлів ПК швидкісних судів із НЗГ показує, що найбільший процент мають несправності системи гідроправління – більше ніж 50%.

Приклад несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ наведені в табл. 2.

За результатами проведеного аналізу пропонується побудувати діаграму Ішікави несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ.

Діаграма Ішікави – відома як діаграма «риб'ячої кістки» (Fishbone Diagram) або «причиново-наслідкова» діаграма (Cause and Effect Diagram), а також як діаграма «аналізу кореневих причин». Діаграма Ішікави представляє собою один з семи основних інструментів вимірювання, оцінювання, контролю та покращення якості виробничих процесів, що входять до «родини інструментів контролю якості» [9].

Така діаграма надає можливість виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами та більш достеменно зрозуміти досліджуваний процес. Діаграма сприяє визначенню головних чинників, які спричиняють найзначніший внесок до проблеми, що розглядається, та попередженню або усуненню їх дії.

На рис. 5 наведена запропонована у роботі діаграма Ішікави несправностей основних функціональних вузлів ПК з НЗГ.

Основні типи приводів маломірних швидкісних суден

№ з/п	Назва приводу	Розміщення приводу	Особливості побудови приводу	Плюси та мінуси приводу
1	Привід на вал (Shaft drive)		Двигун обертає вал, на кінці якого закріплений гребний гвинт. Позаду гвинта перо керма, що спрямовує потік води	Плюси: простота, надійність і досить ефективна витрата палива. Мінуси: на невеликих і середньорозмірних судах машинне відділення займає найширшу ділянку нижньої палуби
2	Кутовий привід (V-drive)		Двигун встановлюють у кормі, а вал розділений на 2 частини: перша йде вперед, з'єднуючись з редуктором, друга йде назад від редуктора і закінчується гвинтом	Плюси: простота і надійність; невимогливість до сервісу; широкий діапазон використання; високий ККД на низьких швидкостях; хороша курсова стійкість Мінуси: уразливість валолінії під час зіткнення з підводними перешкодами і плаваючими об'єктами; значна осадка судна; зниження ККД при збільшенні швидкості
3	Поворотно-откидні колонки (Sterndrive)		Гібрид стаціонарного і підвісного мотора	Плюси: висока маневреність і керованість; низька витрата палива; компактний моторний відсік; встановлюється з бензиновими і дизельними двигунами; багатий вибір гребних гвинтів. Мінуси: невеликий ресурс; не підходять для водотонажних суден – тільки тих, що глісують, невеликого і середнього розміру
4	Днищеві колонки (Pod Drive)		Встановлюються не на транці, а на днищі яхти. Кожна з пари колонок повертається незалежно	Плюси: велика маневреність і швидкість; економічна витрата палива; низький рівень шуму і вібрації; суперкомпактний моторний відсік. Мінуси: досить дороге обслуговування і вимогливість до рівня сервісу; збільшена осадка; вимагають особливої конфігурації днища
5	Водомет (Water Jet)		Відсутність гвинтів і будь-яких інших обертових частин	Плюси: висока керованість і маневреність; можливість екстреного гальмування; мала осадка; не передає вібрацію на корпус. Мінуси: може забиватися водоростями і дрібним камінням; якщо човен не використовується, нутрощі водомета швидко обростають, що призводить до значної втрати швидкості
6	Привід Арнесона (Arneson Drive, surface drive)		Вал гребного гвинта поміщається в тунелі в корпусі судна і виходить за транець, закінчуючись великим гвинтом з особливим профілюванням лопатей	Плюси: дуже висока швидкість при зниженні витрати палива; можливість регулювання осадку; зменшується шум і передача вібрацій на корпус. Мінуси: висока вартість купівлі та обслуговування

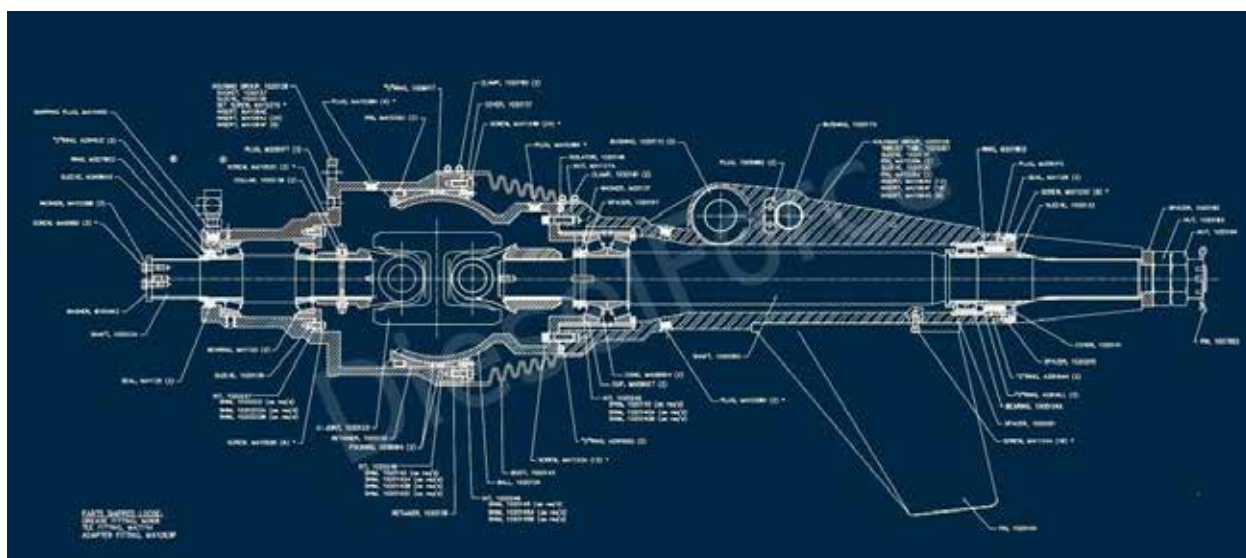


Рис. 1. Основні функціональні вузли пропульсивного комплексу швидкісних судів з НЗГ

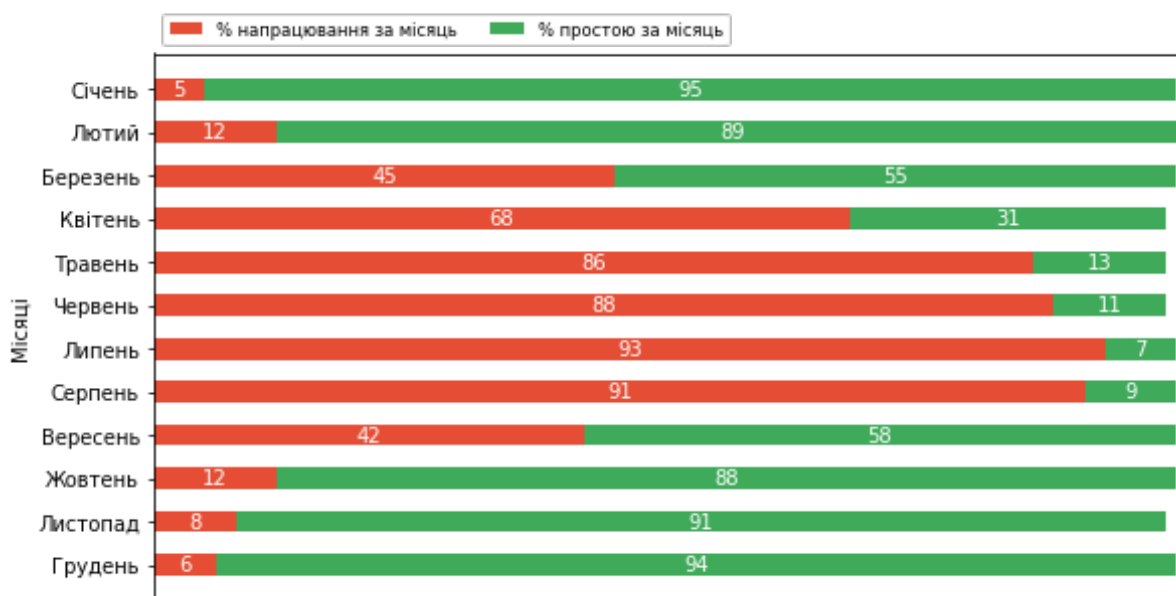


Рис. 2. Середньорічні напруцювання ГД в експлуатації

Несправності ПК із НЗГ (тріщини на транці судна, протікання мастила) виникають у гарантійний період і є результатом роботи ГД на підвищених навантаженнях через вплив вібрації елементів ПК із НЗГ. Відмови призвели до простоїв судів і значних витрат на ремонт. На жаль, на судах із НЗГ контроль та оцінка технічного стану ПК методами безрозбірної діагностики в експлуатації не проводиться. При цьому діаграма Ішікави може використовуватися як аналітичний інструмент для перегляду дії можливих факторів та виокремлення найважливіших причин, дія яких породжує конкретні наслідки та піддається управлінню при визначенні та усуненні несправностей

основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ.

Висновки. У статті розглянуто основні типи приводів маломірних швидкісних суден з точки зору їх розміщення, побудови, переваг та недоліків. Визначено, що одним з найбільш ефективних є привід Арнесона, особливістю якого є використання напівзанурювальних гвинтів, що працюють не у воді, а на кордоні води і повітря.

За результатами аналізу завантаженості суден із напівзанурювальними гвинтами з початку їх експлуатації визначено, що середній час напруцювання їх не перевищує 50% від загального фонду робочого часу. Визначено, що основні

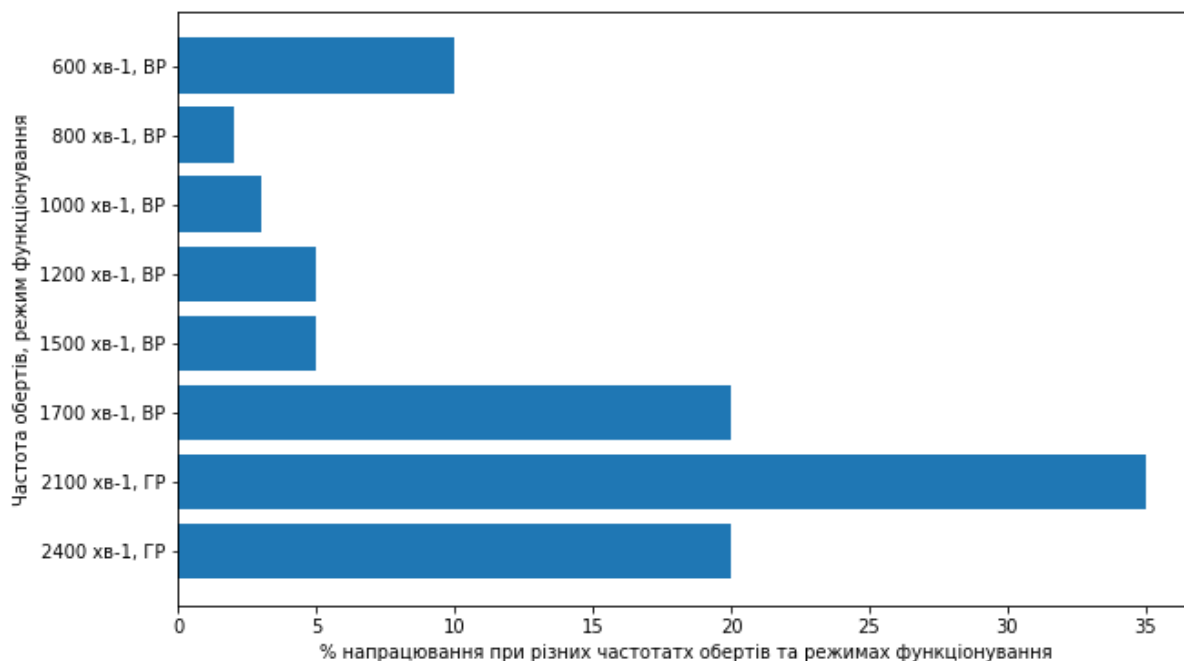


Рис. 3. Час експлуатації ГД на різних режимах роботи

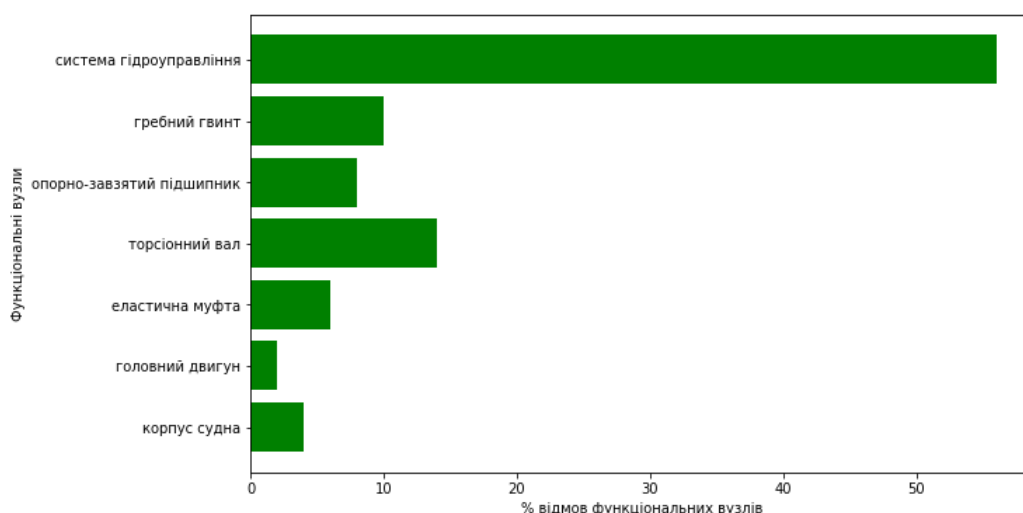


Рис. 4. Несправності основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ

режими роботи головного двигуна з використанням напівзанурювальних гвинтів (від 1700 до 2400 хв⁻¹) складають близько 80% від загального часу роботи двигунів. Тривалість завантаженості судів у літній період практично в 3 рази перевищує завантаженість у зимовий період.

Результати аналізу процентного співвідношення характерних відмов і несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу швидкісних судів із напівзанурюваль-

ними гвинтами показали, що найчастіше несправності виникають у системі гідроуправління.

За результатами проведеного аналізу побудовано діаграму Ішикави несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з напівзанурювальними гвинтами. Розроблена діаграма надає можливість виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами та більш достеменно зрозуміти досліджуваний процес.

Таблиця 2

Вигляд несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ

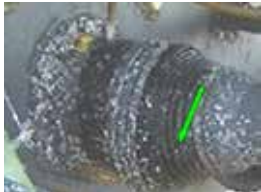
№	Несправність	Приклад вигляду	№	Несправність	Приклад вигляду
1	Тріщина на транці судна		6	Перегрів компенсатора ГД	
2	Руйнування торсіонного вала		7	Обрив еластичної муфти	
3	Обрив юпки поршня ГД		8	Розрив захисних чохла (під водою)	
4	Поломка шатунів ГД		9	Знос сферопідшипників	
5	Руйнування картера ГД		10	Розрив гнучких шлангів	



Рис. 5. Діаграма Ішикави несправностей основних функціональних вузлів ПК з НЗГ

Список літератури:

1. Blount D., Bartee R. Design of Propulsion Systems for High-Speed Craft. *Marine Technology*. 1997. Vol. 34. P. 276–292. DOI: 10.5957/mtl.1997.34.4.276.
2. Gatete E., Ndiritu H., Kiplimo R. Model-Based Performance Improvement of a High Speed-Boat Running on an Outboard Engine. *Journal of Sustainable Energy Engineering*. 2018. Vol. 4, No. 3. P. 111–124.
3. Gaggero S., Bonvino C., Ferrando M., Villa D., Gironi C., Mitri D. A new concept of a very high speed craft: design issues. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/308300889_A_new_concept_of_a_very_high_speed_craft_design_issues (дата звернення: 04.10.2024).
4. Mashud K. Propeller Design. *Journal of the American Society for Naval Engineers*. 2002. Vol. 36, No 4. P. 693–695.
5. Boucetta D., Imine O. Numerical Simulation of the Flow around Marine Propeller Series. *Journal of Physical Science and Application*. 2016. Vol. 6, No 3. P. 55–61.
6. Manzke M., Rung T. Propeller-flow predictions using turbulent vorticity-confinement. *Computational Fluid Dynamics: 5th European Conference, Lisbon, Portugal, 14-17 June 2010. ECCOMAS CFD*. 2010. P. 19.
7. Allison J. L. Marine Waterjet Propulsion. *Chesapeake Section SNAME*. 1992.
8. Rose J. C., Kruppa C. F. L., Koushan K. Surface Piercing Propellers-Propeller/Hull Interaction. *Fast '93 : 2nd Intl Conf on Fast Sea Transportation, Yokohama, Japan, 13-16 December 1993. Yokohama : Soc Naval Architects of Japan*, 1993. Vol. 1. P. 867.
9. Ishikawa K. What is Total Quality Control? The Japanese Way. London : Prentice Hall, 1985. 215 p.
10. Mirjalili S., Lewis A., Mirjalili S. M. Multi-objective Optimisation of Marine Propellers. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 51. P. 2247–2256. DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.383.
11. Ekinici S. A Practical Approach for Design of Marine Propellers with Systematic Propeller Series. *Brodogradnja*. 2011. Vol. 62, No 2. P. 123–129.
12. Bal S. A Method for Optimum Cavitating Ship Propellers. *TUBITAK, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2011. Vol. 35, No 3. P. 139–158.

Voichenko T.O., Tryshyn V.V., Riashchenko O.I., Lisovskyi S.V. THE STUDY OF THE VESSELS PROPULSION COMPLEXES OPERATION PROBLEMS WITH SEMI-SUBMERSIBLE PROPELLERS

The aim of this paper is to study the problems of technical operation of propulsion systems of ships with semi-submersible propellers with further construction of the “root cause analysis” diagram (Ishikawa diagram). This goal is achieved by, firstly, analysing the main types of drives of small high-speed vessels in terms of their placement, construction, advantages and disadvantages; secondly, analysing the workload of vessels with semi-submersible propellers from the beginning of their operation; thirdly, analysing the percentage of typical failures and malfunctions of the main functional units of the propulsion complex of high-speed vessels with semi-submersible propellers. The analysis of the main types of drives for small high-speed vessels has made it possible to establish the peculiarities of the drive construction and its positive and negative aspects. It was found that at the water-air interface, where the resistance drops sharply, the Arneson drive with semi-submersible propellers is considered the most common. It provides a significant increase in speed and fuel consumption, reduces the vessel's draft, and solves the problem of cavitation. Therefore, vessels with semi-submersible propellers are most widely used for passenger transportation and special tasks related to patrolling, state border protection, searching for poachers, etc. The results of the analysis showed that their average operating time does not exceed 50% of the total operating time; the main modes of operation of the main engine using semi-submersible propellers account for about 80% of the total engine operating time; the duration of vessel loading in summer is almost 3 times higher than in winter; and the largest percentage of malfunctions of the main functional units of the propulsion complex are caused by malfunctions of the hydraulic control system. The most important result of the research is the constructed Ishikawa diagram of malfunctions of the main functional units of the propulsion complex with semi-submersible screws. Thus, the developed diagram makes it possible to identify the key relationships between various factors and to understand the process under study more accurately.

Key words: operation, vessel, propulsion system, partially submerged propellers, analysis, diagram.

УДК 656.7:630*9
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/38>

Герасименко І.М.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Пронь С.В.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Висоцька І.І.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Соловійова О.О.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ МОНІТОРИНГУ ЩОДО СТАНУ ЛІСОВИХ МАСИВІВ У ПОВОЄННИЙ ЧАС

Лісові пожежі – це природне явище, яке є надзвичайно небезпечним і руйнівним. В умовах воєнного стану, в Україні, лісові пожежі можуть виникати також внаслідок використання тяжкого озброєння, авіаційних ракет, бомб. Дослідження лісових пожеж під час дії воєнного стану є складним і ризикованим, оскільки основним пріоритетом у випадку їх виникнення є гасіння вогню. Експериментальне моделювання пожежі в реальних умовах проводиться дуже рідко через ризик втрати контролю над вогнем. Визначено, що важливим завданням для підрозділів лісового господарства є підвищення ефективності заходів щодо забезпечення пожежної безпеки. З'ясовано, що одним з таких заходів може бути патрулювання лісових масивів України за допомогою безпілотних літальних апаратів, з метою виявлення осередків загоряння та своєчасного прийняття рішення щодо усунення пожежі. Також необхідно, з особливою увагою, розглянути регіони країни, де велись активні бойові дії. Лісові масиви, в цих регіонах, можуть бути потенційно забруднені вибухонебезпечними предметами. До таких регіонів, з метою патрулювання і спостереження за станом лісових масивів, доступ працівників лісового господарства обмежений і тому туди можуть дістатися тільки безпілотні літальні апарати. У статті досліджено стан лісового господарства регіонів України, на території яких відбувалися бойові дії та які потенційно можуть бути забруднені вибухонебезпечними предметами. У статті розкрито масштаби наслідків та негативного впливу на лісове господарство України від забруднення вибухонебезпечними предметами та запропоновано деякі заходи щодо поліпшення ситуації, що склалася. Також у статті визначено алгоритм дій при виконанні робіт з пожежогасіння лісових масивів, які потенційно можуть бути забруднені вибухонебезпечними предметами. Такі дії передбачають застосування безпілотних літальних апаратів для патрулювання лісових масивів.

Ключові слова: авіаційні роботи, лісові масиви, вибухонебезпечні предмети, пожежогасіння, моніторинг, спостереження, безпілотний літальний апарат.

Постановка проблеми. Проблема забруднення територій вибухонебезпечними предметами, з якою Україна зіткнулася ще в 2014 році, набула нової загрози з початком повномасштабної війни в 2022 році. За даними Державної служби з надзвичайних ситуацій, станом на серпень 2022 року, більше третини території України є потенційно забрудненою боєприпасами та вибухонебезпечними предметами. Процес розмінування та знешкодження таких об'єктів займе багато років. Тепер вулиці, узбіччя, ліси, поля, річки та озера в районах, де відбувалися активні бойові дії, ста-

новлять потенційну небезпеку і щодня загрожують мешканцям міст і селищ України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питаннями, пов'язаними із різноманітними дослідженнями щодо застосування повітряних засобів для вирішення завдань охорони та контролю стану лісового господарства займалася низка українських вчених, таких як: Ковальчук О. І., Петренко І. В., Сидоренко О. М., Литвиненко В. П., Гусак О. М., Яворовський П. П., Зібцев С. В., Соловійова О. О., Гребень О. С., Яцків В. В., Мікосянчик О. О., Халмурадов Б. Д., Кічата Н. М.,

Набильська А. І., Суворова Н. О., Козуб А. М. та ін. Ці наукові доробки відображають практичні та наукові досягнення у сфері використання авіаційних пілотованих та безпілотних технологій у лісовому господарстві України. Але в цих працях не враховані реалії сьогодення: повномасштабне вторгнення РФ на територію України та, як наслідок, забрудненість території лісового господарства вибухонебезпечними предметами. Ці аспекти висвітлені недостатньо та потребують вдосконалення.

Постановка завдання. Метою статті є удосконалення організаційних заходів щодо пожежогасіння лісових масивів України, які можуть бути потенційно забруднені вибухонебезпечними предметами за рахунок залучення безпілотних літальних апаратів для моніторингу пожежного стану лісового господарства, що дасть можливість своєчасного виявлення осередків пожеж та їх ліквідації.

Виклад основного матеріалу. До початку повномасштабного військового вторгнення Росії в Україну 24 лютого 2022 року вибухонебезпечні предмети регулярно виявлялися в лісах по всій країні. Це було наслідком бойових дій Другої світової війни, а також розташування на території колишніх і діючих військових полігонів та в зоні операції об'єднаних сил. Світовий досвід свідчить, що навіть через багато років після закінчення військових конфліктів більшість таких лісів залишаються замінованими, огороженими та недоступними для цивільних осіб, а лісове господарство в них не проводиться.

Приблизно 30% території України, що становить 174 тисячі квадратних кілометрів, забруднено вибухонебезпечними предметами через російську агресію. Серед них 13,5 тисяч квадратних кілометрів займають водні об'єкти (рис. 1).

На сьогоднішній день піротехніки провели обстеження 93 тисяч гектарів території та 7,5 тисяч гектарів водної площі, знешкодивши 427 тисяч вибухонебезпечних предметів.

Головні зусилля рятувальників спрямовані на розмінування звільнених населених пунктів та відновлення інфраструктури деокупованих територій. Щодня до цих робіт залучається більше 700 піротехніків та 200 одиниць техніки.

Ведення лісового господарства в лісах, де після 24 лютого 2022 року мали місце активні бойові дії, падіння ракет, артилерійських снарядів, авіаційних бомб, а також на замінованих територіях, включаючи зони з розтяжками, тимчасово зупинено до їх очищення.

Світова практика свідчить про те, що військові конфлікти завдають шкоди навколишньому середовищу. Враховуючи обсяги бойових дій в Україні, можна прогнозувати суттєвий негативний вплив війни на лісове господарство та природно-заповідні території. Зокрема:

- знищення лісів внаслідок бойових дій та пожеж, які з'являються через них. Це може спричинити зменшення лісистості в певних регіонах та викликати необхідність у розчищенні і повторному залісненні цих територій;

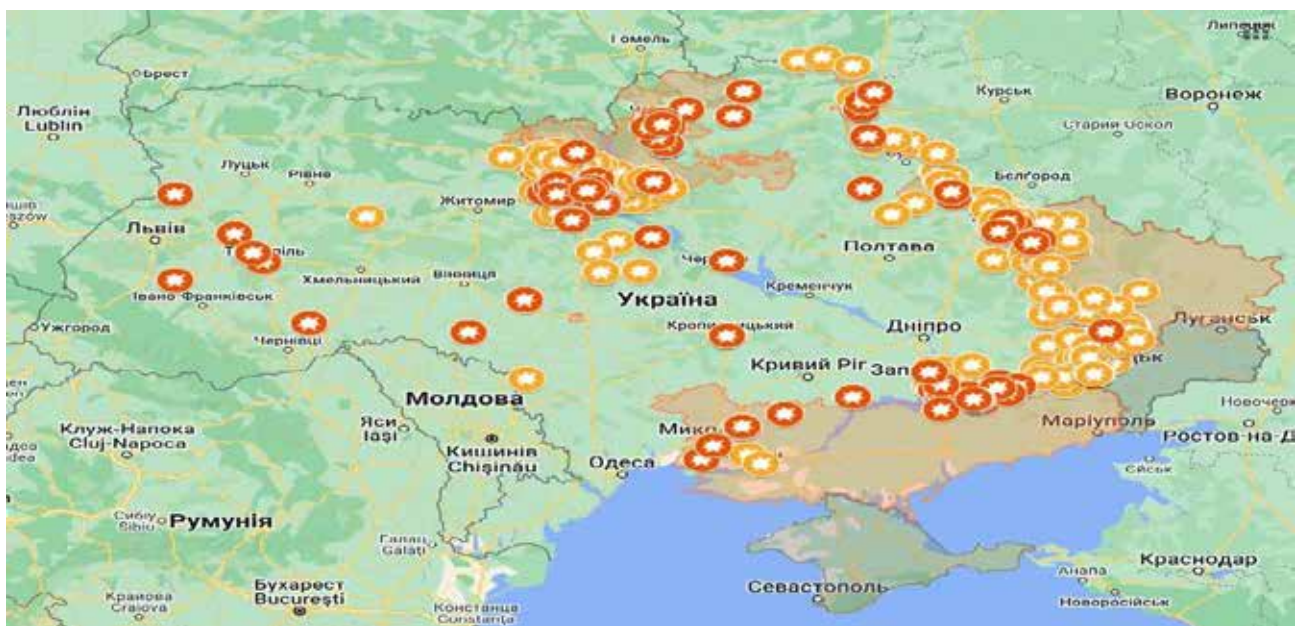


Рис. 1. Мапа територій, які потенційно можуть бути забруднені вибухонебезпечними предметами [1]

– зниження можливості контролювати пожежі на територіях, де проходили бойові дії. Через забруднення вибухонебезпечними предметами та мінами доступ до цих зон буде обмежений, а управління пожежами та їх гасіння стане небезпечним для рятувальників. Це може призвести до розширення площі пожеж і подальшого знеліснення регіону в короткостроковій перспективі;

– неможливість проведення розчищення та лісокультурних заходів на територіях, де загинули ліси, через забруднення вибухонебезпечними предметами та мінами;

– неможливість або обмежене використання деревини з територій інтенсивних бойових дій для виготовлення пиломатеріалів через наявність снарядних уламків. Ця ситуація може змусити лісогосподарські підприємства залишати такі ділянки з економічних причин і стати фактором нестійкого використання лісових ресурсів;

– нездатність проводити лісове господарство, а також реалізовувати протипожежні та лісозахисні заходи в лісах, забруднених вибухонебезпечними предметами та мінами, до моменту їх розмінування. Це може спричинити погіршення санітарного стану лісів і підвищити ризик неконтрольованого розповсюдження пожеж;

– перерозподіл населення внаслідок внутрішньої міграції посилить антропогенний тиск і може призвести до збільшення використання лісових ресурсів у районах, які не підпадають під зону бойових дій. У короткостроковій перспективі, через погіршення економічної ситуації в країні та зменшення запасів природного газу в сховищах, може зрости потреба в паливній деревині, що вплине на стаке використання лісових ресурсів у певних регіонах;

– погіршення економічного становища населення призведе до зростання інтенсивності використання недеревинних ресурсів лісу. Крім того, може зрости кількість незаконних рубок;

– повернення вимушених переселенців до своїх домівок може призвести до зростання попиту на деревину для будівництва та паливну деревину в районах, які постраждали від бойових дій. Це, в свою чергу, може збільшити ризик незаконних рубок, а також сприяти забрудненню територій і нестабільному веденню лісового господарства;

– забруднення об'єктів природно-заповідного фонду вибухонебезпечними предметами та мінами може негативно вплинути на біорізноманіття території, призводячи до загибелі великої фауни та знищення цінних екосистем;

– обмеження у проведенні наукових досліджень через забруднення території. Призупинення безперервних довгострокових досліджень з тієї ж причини;

– необхідність створення планів управління територіями, забрудненими вибухонебезпечними предметами та мінами. Зміна маршрутів патрулювання та закриття частини лісових доріг можуть вплинути на звичний режим роботи лісогосподарських підприємств і об'єктів природно-заповідного фонду, що вимагатиме адаптаційного періоду в їхній діяльності;

– покинуті та забруднені сільськогосподарські землі можуть бути передані до природно-заповідного фонду або лісогосподарських підприємств. Це вимагатиме розробки процедури їх передачі, враховуючи потенційні ризики, а також планів для їхнього управління;

– втрата кваліфікованих спеціалістів внаслідок вимушеної міграції населення.

Масове використання артилерії та ударної авіації проти військових і інфраструктурних об'єктів призводить до виникнення пожеж у природних екосистемах. За інформацією Регіонального Східноєвропейського центру моніторингу пожеж, такі пожежі охопили приблизно 2,4 мільйона гектарів, з яких 330 тисяч гектарів становлять лісові угіддя. Зокрема, тисячі гектарів лісу знищено в національних природних парках «Кремінські ліси», «Святі гори», «Білобережжя Святослава» та в Чорнобильському біосферному заповіднику [2].

Ліси в Чернігівській (423,5 тис. га), Сумській (287,9 тис. га) та Луганській (205,1 тис. га) областях підпадають під ризик через військові дії. У Житомирській, Київській, Харківській областях та в зоні відчуження Чорнобиля небезпечні території займають від 126 до 165 тис. га (рис. 2).

Протягом спекотного літа 2022 року на території Херсонщини майже щодня виникали пожежі в лісах і на полях через обстріли. Наприклад, поблизу села Розлив Білозерської громади загорілося 12 гектарів посівів зернових, а також спалахнув сосновий ліс в Олешківській громаді. Однак через присутність окупаційних військ ліквідувати ці пожежі не було можливості. Внаслідок обстрілу Генічеського району загорілася пшеничне поле біля селища Новоолекіївка та села Новопокровка, в результаті чого постраждали як врожай, так і сільськогосподарська техніка. Після обстрілу військами РФ у Каховському районі спалахнув сосновий ліс на площі понад 5 гектарів.

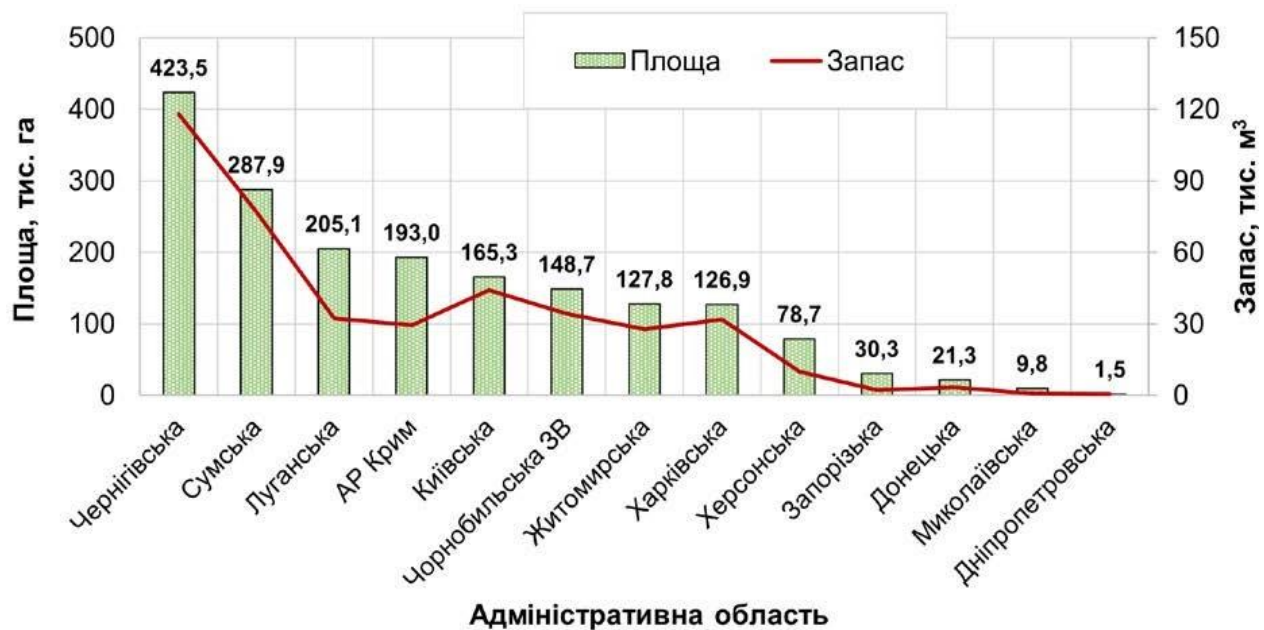


Рис. 2. Розподіл площі та запасу вкритих лісом лісових ділянок, які опинилися в зоні військових дій та в окупованій зоні за адміністративними областями [1]

У Великоолександрівській громаді через обстріли окупантів загорілися посіви озимої пшениці та ячменю на площі близько 150 гектарів. Також через артилерійський обстріл росіян сталося загоряння соснового лісу поблизу села Кохани, а на території Олешків загорілося три гектари соснового лісу.

Влітку 2022 року в Сумській області через обстріли окупантів сталася лісова пожежа. Вітер дув у бік Росії, що призвело до поширення вогню на позиції загарбників. На території України вигоріло приблизно один гектар лісових насаджень. Крім того, у лісових масивах Сумського держлісфонду було зафіксовано п'ять випадків загорянь. Два з них сталися у Глухівському структурному підрозділі Шосткинського держлісгоспу, а по одному – у лісах Середино-Будського структурного підрозділу Свеського держлісгоспу, а також у лісах Тростянецького та Краснопільського підприємств. Лісова пожежа в Краснопільському держлісгоспі стала найбільшою за масштабами, завдавши шкоди 0,50 га лісових насаджень. В цілому по області внаслідок пожеж постраждало 0,92 га лісу. Усі пожежі виникли через обстріли ворога прикордонних територій. Для гасіння пожеж необхідно узгоджувати дії з підрозділами ЗСУ для отримання офіційних дозволів. Гасіння пожежі в Краснопільському держлісгоспі було абсолютно неможливим. Локалізації пожежі сприяла заздалегідь підготовлена мінералізована смуга [3].

Найбільша загроза для здоров'я та життя працівників лісової охорони і лісового господарства виникає під час пожеж у соснових лісах, які забруднені вибухонебезпечними предметами. Такі пожежі можуть спричинити вибух нерозірваних боєприпасів, що залишилися після бойових дій. Внаслідок цього в цих лісах існує високий ризик травмування або загибелі працівників лісової охорони через уламки або вибухи.

У лісах, які можуть бути забруднені вибухонебезпечними предметами, заборонено:

- проводити наземну розвідку пожеж. Дозволяється використовувати безпілотні літальні апарати та відеокамери для спостереження;
- гасити лісові пожежі;
- в'їжджати пожежною технікою (ЗІЛ-131, ГАЗ-66 або інші важкі пожежні автомобілі, легкі пожежні модулі, автомобілі лісової охорони, трактори, мотоцикли) та прокладати пожежні рукави [4].

Основною стратегією гасіння пожеж у лісах, що містять вибухонебезпечні предмети, є моніторинг їх розвитку з безпечної відстані за допомогою безпілотних літальних апаратів та відеокамер. Важливо забезпечити безпеку місцевих жителів, які перебувають у радіусі одного кілометра від вогнища пожежі, шляхом їх оповіщення та запобігання поширенню вогню на незабруднені території.

На основі розвідувальних даних про напрямок і швидкість вітру, а також про швидкість і напрям-



Рис. 3. Алгоритм дій при виконанні робіт з пожежогасіння лісових масивів, які потенційно можуть бути забруднені вибухонебезпечними предметами

мок поширення пожежі, визначається місце, де вогонь може вийти на незабруднену територію, що містить вибухонебезпечні предмети, а також точка атаки, де готують рубіж для локалізації та ліквідації пожежі. Рекомендується використовувати наявні природні або штучні протипожежні бар'єри, зокрема дороги з твердим покриттям. У цьому процесі можуть бути застосовані кілька мінералізованих смуг, відпал у бік пожежі (за умови наявності підготовленого персоналу та запалювальних пристроїв), валка дерев кронами в напрямку вогню, а також змочування наземних рослинних матеріалів. Гасіння повинні виконувати екіпіровані та підготовлені протипожежні підрозділи лісових господарств (ЛПС, лісова охорона) у співпраці з залученими підрозділами ДСНС, добровільними пожежними дружинами та авіації (рис. 3).

Цей алгоритм враховує як природні умови, так і ризики, пов'язані з вибухонебезпечними предметами, що гарантує безпеку працівників та ефективність гасіння лісових пожеж в Україні.

Гасіння лісових пожеж є найскладнішою частиною комплексних протипожежних заходів. Основним завданням протипожежного проектування лісів є організація служби гасіння пожеж, яка дозволяє ліквідувати їх на початковій стадії розвитку з мінімальними витратами ресурсів і коштів. Окрім проведення профілактичних заходів щодо лісових пожеж, надзвичайно важливо забезпечити своєчасне виявлення виникаючих пожеж у лісі та їх ліквідацію на ранніх етапах [5]. Це можливо за умови постійного моніторингу лісового господарства засобами безпілотних літальних апаратів.

Військова агресія проти України, що почалася 24 лютого 2022 року, значно ускладнила діяльність лісових господарств у запобіганні та ліквідації великих лісових пожеж. Це створює загрозу не лише для лісових масивів, а й для жителів та населених пунктів, які знаходяться поблизу соснових лісів. Основні труднощі включають крадіжки або пошкодження окупантами пожежних

автомобілів, тракторів та іншої техніки, неможливість використання авіації для гасіння вогню, забруднення лісів вибухонебезпечними предметами, обмеження доступу до лісів через потреби оборони, нестачу паливно-мастильних матеріалів для гасіння, а також обмеження у використанні радіозв'язку, мобільного зв'язку та безпілотників для моніторингу пожеж.

Для проведення патрулювання та спостереження за пожежним станом лісового господарства у районах, де велись військові дії та доступ працівників лісового господарства неможливий, необхідно застосовувати безпілотні літальні апарати (табл. 1).

В Україні створюють понад десяти різновидів безпілотних літальних апаратів, з яких п'ять мають потенціал для використання в лісовому господарстві. Ці апарати є економічними та ефективними сучасними інструментами для виявлення лісових пожеж [6].

Проведення авіаційних робіт з патрулювання лісових масивів із залученням безпілотних літальних апаратів дасть змогу в режимі реального часу відслідковувати небезпечні лісові ділянки та вчасно реагувати на проблему, щоб значно скоротити негативні наслідки, до яких можуть призвести пожежі у лісах, які забруднені вибухонебезпечними предметами.

Висновки. Головною метою охорони лісів, забруднених вибухонебезпечними предметами, є забезпечення особистої безпеки місцевих мешканців, пожежної безпеки населених пунктів, розташованих в радіусі одного кілометра від цих лісів, а також захист лісгосподарського персоналу. Щоб запобігти негативним наслідкам розгортання лісових пожеж, у місцях ведення бойових дій, які можуть бути забруднені вибухонебезпечними предметами, необхідно проводити роботи з патрулювання небезпечних районів за допомогою безпілотних літальних апаратів, що дасть змогу своєчасно виявляти осередки займання і оперативно реагувати.

Таблиця 1
Безпілотні літальні апарати, які потенційно можуть виконувати авіаційні роботи з патрулювання лісових масивів [7]

Тип БПС	Вага, кг	Висота польоту, км	Трив. польоту, год.	Підпарашутна посадка	Точка повернення, км від «бази»
«Овод» М106	4,95	3,5	2,5 – 3	+	90
UA-бета	4,95	1,5	1,5	+	50
АС – 1 Фурія	5,5	2	2	+	60
Spectator M	6,5	2	2	+	60
Лелека 100	5,05	1,5	2,5	-	75

Список літератури:

1. Лісоуправління на територіях, забруднених вибухонебезпечними предметами / С.В. Зібцев, О.М. Сошенський, Й.Г. Голдаммер, В.В. Миронюк, О.А. Борсук, В.В. Гуменюк, В.Л. Мешкова, О.В. Василюк, І.Ф. Букша – WWF-Україна, 2022. – 148 с.
2. Як війна впливає на природу України та чому збереження й відновлення природних екосистем є важливим у повоєнному відновленні. <https://ecoaction.org.ua/iak-vijna-vplyvaie-na-pryrodu.html>
3. Дії підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану: навч. посіб. / Коваль М. С. та ін. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. – 306 с.
4. Державне агентство лісових ресурсів України. Правила пожежної безпеки в лісах України. <https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/uploaded-files/pravylapozhezhnoibezpeky.doc>.
5. Мікосянчик О. О., Халмурадов Б. Д., Кічата Н. М., Набільська А. І. Організаційні аспекти застосування авіаційних сил для гасіння лісової пожежі. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2021, випуск 1(63). С. 138-141.
6. Ковальчук О. І., Петренко І. В. Використання безпілотних літальних апаратів у лісовому господарстві України. *Український журнал лісівництва та деревинознавства*, 2022, Том 13, № 4, с. 6-15.
7. Стратегія наукового пошуку в НАУ <https://nau.edu.ua/site/variables/docs/docsmenu/nauka/konferencii/nauka/Kharchenko.pdf>.

Herasymenko I.M., Pron S.V., Vysotska I.I., Soloviova O.O. APPLICATION OF PILOTLESS AIRCRAFTS IS DURING REALIZATION OF MONITORING IN RELATION TO THE STATE OF FOREST ARRAYS IN POST-WAR TIME

Forest fires are a natural phenomenon that is extremely dangerous and destructive. Under martial law in Ukraine, forest fires can also occur as a result of the use of heavy weapons, aircraft missiles, and bombs. The study of forest fires during martial law is difficult and risky, as the main priority in the event of their occurrence is firefighting. Experimental modeling of a fire in real conditions is rarely carried out because of the risk of losing control over the fire. It is determined that an important task for forestry units is to increase the effectiveness of fire safety measures. It has been found that one of such measures may be patrolling the forests of Ukraine with the help of unmanned aerial vehicles in order to detect foci of fire and make timely decisions on fire elimination. It is also necessary to pay special attention to the regions of the country where active hostilities have been taking place. Forests in these regions may be potentially contaminated with explosive devices. In order to patrol and monitor the condition of forests in these regions, access to forestry workers is limited and therefore only unmanned aerial vehicles can get there. The article examines the state of forestry in the regions of Ukraine where military operations took place and which could potentially be contaminated by explosive ordnance. The article reveals the extent of the consequences and negative impact on the forestry of Ukraine from contamination by explosive ordnance and proposes some measures to improve the current situation. The article also defines an algorithm of actions when performing fire extinguishing works in forest areas that could potentially be contaminated with explosive objects. Such actions involve the use of unmanned aerial vehicles to patrol forests.

Key words: aerial work, forest areas, explosive objects, firefighting, monitoring, surveillance, unmanned aerial vehicle.

Гордєєв М.Г.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

ПОТЕНЦІАЛ І ВИКЛИКИ АВТОМАТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ СУДНАМИ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті розглядається питання про те, як морська індустрія все ширше впроваджує автономні системи навігації та управління суднами, що використовують технології штучного інтелекту (ШІ).

Мета статті – визначити як ШІ розширює можливості автоматичної навігації та управління суднами, а також проаналізувати елементи, що впливають на продуктивність і безпеку автономного судноплавства.

Наукова новизна. Запропоновано системний аналіз інтеграції ШІ з автоматизованими навігаційними системами, включаючи вдосконалене розпізнавання об'єктів, прийняття рішень, прогнозування погодних умов і оптимізацію паливної ефективності. Досліджено проблеми кібербезпеки, правового регулювання та адаптації морської інфраструктури до автономного судноплавства.

Результати. Проаналізовано ключові компоненти автономної навігації суден, їх взаємодію з датчиками та системами керування. Визначено основні технологічні, правові та етичні виклики, що постають перед впровадженням ШІ в морські перевезення. На Рисунку 1 представлено основні компоненти автономної навігації судна, підкреслюючи інтеграцію ШІ з різними датчиками і системами для сприйняття навколишнього середовища, прийняття рішень. На Рисунку 2 зображено виклики автономного управління судном, що ілюструють питання технологічної надійності, кібербезпеки, правових та етичних рамок, а також інтеграції ШІ з існуючою морською інфраструктурою.

Висновки. ШІ відкриває широкі можливості для трансформації морської навігації та управління суднами, оскільки він підвищує рівень безпеки, а також ефективність та екологічну стійкість. Впровадження ШІ стикається з серйозними перешкодами, які вимагають скоординованих дій зацікавлених сторін галузі, бізнесу, державних установ та міжнародних організацій. Повноцінне впровадження автономної навігації залежить від вирішення проблем кібербезпеки, розвитку правової бази та підготовки експертів з питань інтеграції ШІ. Усі зацікавлені сторони повинні спільно працювати над розробкою керівних принципів, які захистять морські операції від ризиків для безпеки, а також сприятимуть підвищенню надійності поряд з інноваційним прогресом.

Ключові слова: автономні судна, автономне судноплавство, управління рухом судна, штучний інтелект, навігація.

Постановка проблеми. Сучасні морські розробки, зосереджені на управлінні суднами на основі штучного інтелекту разом з автоматичними навігаційними системами, демонструють значний потенціал для підвищення ефективності судноплавства, безпеки операторів та рівня екологічної стійкості. Завдяки ШІ можемо розробляти інноваційні рішення для автоматизації, а також впроваджувати такі функції, як системи розпізнавання об'єктів і алгоритми прийняття рішень, прогнозування погоди, технології оптимізації маршрутів і програми управління ефективністю використання палива. Морські технології підвищують незалежність суден, зменшуючи кількість аварій на воді та кількість членів екіпажу до необхідного рівня, а також зменшуючи викиди шкідливих речовин в атмосферу.

Впровадження автоматизованих навігаційних систем на основі ШІ на судах створює значні

перешкоди під час їх розгортання, які потребують ретельного вивчення. Автоматизовані системи є вразливими цілями для кібератак, які загрожують кораблям, оскільки вони тонуть, блокуючи водні шляхи та спричиняючи екологічні катастрофи. Тестування надійності та перевірка відповідності вимогам безпеки цих систем вимагає ретельної оцінки, оскільки ці системи повинні пройти перевірку відповідно до правил безпеки і технічних стандартів. У міру того, як автономна навігація розширює свою присутність у судноплаванні, робоча сила на морі стикається з потенційним скороченням. Впровадження автономних суден вимагає схвалення відповідальності за інциденти, спричинені такими суднами, а політики повинні визначити етичні протоколи для запобігання несанкціонованому зловживанню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Т.А. Стовба [1] розглядає нові морські рішення для покращення навігаційного обслуговування та захисту навколишнього середовища, приділяючи особливу увагу майбутньому розвитку галузі за допомогою ІІІ та інформаційних технологій. С.С. Сагін та С.В. Сагін [2] показують, як технологія ІІІ може передбачати зіткнення суден і допомагати запобігати нещасним випадкам на морі. І. Калініченко та Є. Богуславський [3] розглядають застосування ІІІ для безпілотної навігації суден у своєму дослідженні. О.В. Бажак, П.К. Квасников та Ю.В. Рижков [4] розглядають переваги BEIDOU для морської навігації, а також сценарії її майбутнього використання в цьому секторі, підкреслюючи її здатність покращувати навігаційні характеристики суден. О.А. Онищенко, О.М. Мельник, С.В. Курдюк, О.І. Дрозденко та Д.А. Бурлаченко [5] досліджують застосування алгоритмів ІІІ для підвищення ефективності автономних суден у морі.

Чен Х. (Chen X.), Ма Д. (Ma D.), Ліу Р. (Liu R.) [6] досліджують інтеграцію ІІІ в різні аспекти морського транспорту, підкреслюючи його потенціал для підвищення ефективності та безпеки. Джалун Ліу (Jialun Liu), Фан Янг (Fan Yang), Шидже Лі (Shijie Li), Якйонг Лі (Yaqiong Lv), Хінью Ху (Xinjue Hu). [7] оцінюють інтелектуальну навігацію кораблів, їхні можливості, поточний стан та виклики. Мадсен А.Н. (Madsen A.N.), Кім Т.Є. (Kim T.E.) [8] досліджують прозорість рішень ІІІ на автономних суднах, а також їхні заходи безпеки. Ветх Є. (Veitch E.), Дибвік Г. (Dybvik H.), Стейнерт М. (Steinert M.) та інші [9] досліджують проблеми управління та навігації, з якими стикаються транспортні засоби, включаючи кораблі. Горі Н. (Horri N.), Голдербаум В. (Holderbaum W.), Гілетті Ф. (Giulietti F.) [10] досліджують значення технології ІІІ для спільної діяльності з передовими судновими навігаційними системами.

Різноманітні наукові дослідження вивчають застосування ІІІ в системах морської навігації та управління, оскільки ця тема набуває все більшого світового інтересу, зберігаючи при цьому значну важливість.

Постановка завдання. Метою статті є виявлення потенціалу та викликів автономної навігації суден за допомогою ІІІ.

Виклад основного матеріалу. Технологія ІІІ надає морським навігаційним системам найважливішу перевагу завдяки швидкій обробці великих масивів даних. Обробляючи в режимі реального часу дані про погоду, GPS-координати і хвилі,

технології ІІІ генерують навігаційні маршрути, виявляючи загрози перешкод для суден і надаючи цінні оперативні дані для забезпечення безпеки на морі [1, с. 391].

Згідно з С.С. Сагіним та С.В. Сагіним: «Впровадження ІІІ в повсякденне виконання обов'язків навігаційного офіцера може суттєво полегшити, а також убезпечити судно від можливих інцидентів. Система ІІІ оброблятиме дані за допомогою алгоритмів і моделей для оцінки поточної ситуації та прогнозування потенційних майбутніх сценаріїв. Це може включати в себе аналіз ризиків зіткнення, оцінка впливу погоди і стану моря, і врахування маневрених можливостей судна» [2, с. 221].

Як зазначають І. Калініченко та Є. Богуславський: «Безпілотні судна при русі мають інерцію і не можуть виконувати довільні команди руху по заданому шляху, крім як на довільно низьких швидкостях» [3, с. 99].

Розвиток автономного судноплавства виділяється як провідний потенціал застосування системи BeiDou. Поєднання можливостей точного позиціонування з надійними каналами зв'язку створює основу для впровадження бортових засобів автоматичного управління. Автономні морські транспортні системи майбутнього отримають переваги, а також підвищать рівень безпеки на морі завдяки інвестиціям в цю технологію. Інтегровані підходи в рамках «розумного судноплавства» отримають вигоду від сучасних технологій зв'язку і управління, включаючи 5G і IoT, а також систем ІІІ. Інструменти прогнозованого технічного обслуговування працюють разом з системами оптимізації маршрутів, які адаптуються до погодних умов і заторів у портах, а також з автоматизованими технологіями запобігання зіткненням [4, с. 887].

Застосування ІІІ в автономних навігаційних апаратах розширює можливості для оптимізації морських операцій. Технологія прогнозування маршруту в реальному часі за допомогою ІІІ дозволяє уникати перешкод і запобігати зіткненням завдяки функціям розпізнавання загроз, що базуються на глибокому навчанні. Впроваджений ІІІ ще більше покращують моніторинг навколишнього середовища та можливості розпізнавання об'єктів, тим самим підвищуючи точність виконання завдань. Інтерпретація морського середовища за допомогою даних про глибину морського дна забезпечує безпечну навігацію. [5, с. 1377].

На Рис. 1 представлено потенціал автоматичної навігації та керування кораблем на основі ІІІ:



Рис. 1. Компоненти автономної навігації суден

ШІ працює як превентивна система, яка інтерпретує дані про стан океану разом із метеорологічними спостереженнями та фактами відстеження морських суден, щоб розпізнати майбутні небезпеки на морі.

Системи ШІ працюють безперервно, не втомлюючись, зберігаючи свою реакцію на сигнал, що знижує ймовірність людської помилки, яка спричиняє морські аварії.

Впровадження автоматизації в навігації та управлінні судном призводить до зниження витрат на паливо, оскільки оптимізований ШІ маршрут відповідає поточним водним умовам і забезпечує безперервну роботу протягом довгих робочих змін без необхідності відпочинку людини.

Суднові системи, що використовують технології ШІ, демонструють вищу ефективність під час автономної роботи, що призводить до збільшення пропускної здатності суден.

Впровадження автоматизованих систем навігації та управління дозволяє морякам розподіляти ресурси на важливі завдання, що вимагають людського інтелекту, включаючи підтримку безпеки на борту і зв'язок між судном і береговою службою.

Використання систем ШІ допомагає зменшити викиди парникових газів, оскільки судна досягають кращої енергоефективності та захищають навколишнє середовище завдяки стратегічному плануванню маршрутів, які оминають екологічно чутливі райони.

На Рис. 2 наведено виклики автоматичної навігації та управління судном на основі ШІ:

ШІ зменшує кількість людських помилок, однак оператори суден стикаються з численними небезпеками, включаючи системні збої в поєднанні зі спробами хакерських атак і потенційними інцидентами, які можуть призвести до серйозних непередбачуваних наслідків.

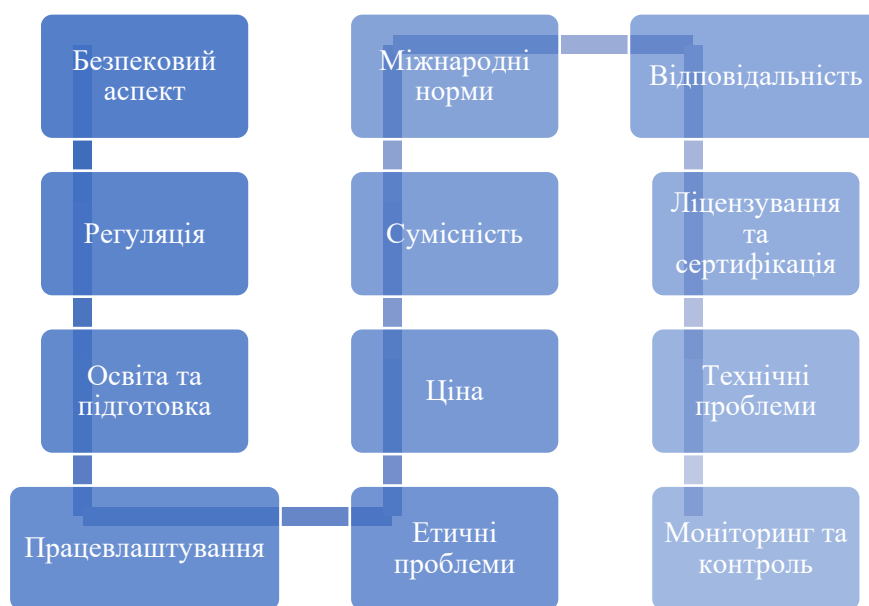


Рис. 2. Виклики автономного управління суднами

Створення міжнародних правил і стандартів, які контролюють застосування штучного інтелекту на судах, є багатоваріантною процедурою, що вимагає тривалого часу на впровадження. Стандарти підготовки суднових екіпажів, які опановують нові навички роботи з системами ШІ, потребують коригування поточних навчальних курсів.

Ризики втрати роботи існують для моряків, оскільки ШІ демонструє здатність автоматизувати їхні робочі функції. Рішення, які приймають системи штучного інтелекту, породжують складні етичні наслідки, що вимагає розробки алгоритмів, здатних впоратися з різноманітними ситуаціями.

Впровадження систем ШІ на судах вимагає значних капіталовкладень, які зазвичай перевищують фінансові можливості більшості невеликих судноплавних компаній.

Судноплавні компанії повинні перевіряти сумісність систем ШІ з поточними навігаційними платформами, щоб не виникало проблем під час їхньої інтеграції. Міжнародна морська організація (ІМО) повинна створити універсальні стандарти для регулювання технологій ШІ на судах, щоб забезпечити міжнародну безпеку судноплавства.

Загальні протоколи повинні встановлювати відповідальність за інциденти та відповідальний розподіл ризиків між судовласниками, виробниками систем ШІ та іншими учасниками морського судноплавства.

Єдина оцінка суднових технологій ШІ слугує для перевірки їхньої експлуатаційної надійності та відповідності світовим стандартам.

Для надійної роботи судна, системи ШІ повинні функціонувати в автономному режимі, одночасно виконуючи завдання самодіагностики, процедури самоконфігурації та обслуговування.

Оперативний нагляд повинен дозволяти системам управління безперервно відстежувати поведінку систем ШІ, щоб виявляти помилки і навмисне неналежне використання.

Навігація та управління суднами відкривають як чудові можливості, так і життєво важливі виклики, які вимагають ретельного стратегічного планування впровадження ШІ, включаючи стандарти безпеки, а також технічний розвиток і етичні міркування.

Потенціал автоматичної навігації та управління суднами на основі Automatic navigation system (ANS) є значним, оскільки він може суттєво підвищити безпеку, ефективність та стабільність навігації на морських, річкових і озерних шляхах. Технологія ШІ визначає, як поєднати

радар і GPS з відеоаналітикою для розробки сучасних автоматизованих навігаційних систем. Технологія ШІ дозволяє системам ідентифікувати найближчі перешкоди, а також передбачати рух інших суден, контролюючи швидкість і напрямки руху, зберігаючи дистанцію до прибережних зон, корабельних аварій і підводних перешкод. Ці системи дозволяють приймати рішення в критичних складних ситуаціях і робити негайний вибір. Судна, керовані ШІ, отримують численні переваги завдяки зменшенню обов'язків екіпажу та покращенню експлуатації судна, що підвищує ефективність використання судноплавних шляхів і водночас зменшує викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Відповідно, існують також певні виклики, пов'язані з (ANS). Велике навантаження стандартів безпеки поряд зі стандартами надійності є критично важливими елементами, особливо в контексті самостійного судноплавства. Системи, керовані ШІ, повинні надійно працювати за будь-яких умов експлуатації, включаючи суворі погодні умови, щільний транспортний потік, погану видимість і різні складні умови навколишнього середовища. Надійні системи передачі даних і зв'язку, які забезпечують безперервний зв'язок між суднами і береговими станціями та компонентами інфраструктури, є важливою вимогою. Етичні та правові питання, такі як відповідальність за інциденти, спричинені автономними системами, є важливим компонентом цієї системи. Розробники ANS повинні також враховувати можливість кібератак, які можуть становити загрозу як безпеці, так і екології. Інші виклики включають необхідність підготовки екіпажу до роботи із ШІ, а також перехід від традиційних систем навігації до автономних. Міжнародні морські організації та уряди разом з представниками галузі повинні створити єдину нормативно-правову базу для вирішення проблем і підтримки морських інновацій задля безпечного морського судноплавства.

Висновки. Застосування ШІ в судноводінні та управлінні суднами демонструє широкі можливості, але потребує належної оцінки ризиків та ефективного управління труднощами впровадження. Впровадження автономного судноплавства вимагає створення надійних безпечних систем, а також програм навчання персоналу та міжнародних правил регулювання автономної навігації. Імпульс до досліджень і розробок відповідних технологій надають п'ять країн, які активно інвестують у цю сферу: Норвегія, Фінляндія

дія, Швеція, Сінгапур і Китай. Міжнародна морська організація разом з іншими міжнародними організаціями працює над створенням стандартів, які сприятимуть трансформації галузі завдяки цим новим змінам. Потенційні переваги автоматичних систем навігації та управління суднами на основі ШІ є значними, але для їх належного використання необхідно усунути численні перешкоди.

Досягнення вимог безпеки та надійності в системах автоматичної навігації та управління суднами вимагає використання програмних платформ, які інтегрують технології ШІ. Стандарти політики та найкращі практики застосування ШІ в морській галузі потребують галузевої співпраці між зацікавленими сторонами, регуляторними органами та науковцями.

Список літератури:

1. Стовба Т.А. Фронезіс використання штучного інтелекту в морській галузі. Наукові перспективи. 2023. № 7(37). С. 387-398. DOI: [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2023-7\(37\)-387-398](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2023-7(37)-387-398) URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/np/article/view/5670/5702> (дата звернення: 24.01.2025).
2. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден. Водний транспорт: Збірник наукових праць. 2024. Випуск 1(39). С. 215-225. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22> URL: <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/335/292> (дата звернення: 24.01.2025).
3. Калініченко І., Богуславський Є. Використання штучного інтелекту безпілотних суден для визначення перешкод при плаванні. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2024, Vol. 3, No. 3, pp. 92-103. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240303.09>. URL: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://isg-journal.com/isjea/article/download/712/395/732&ved=2ahUKewjgtL7A3ZGLAxVuIRAIHSuXL18QFnoECBUQAQ&usq=AOvVaw0yY0qiByAcahTWLW-PnDt4> (дата звернення: 24.01.2025).
4. Бажак О.В. Квасников П.К. Рижков Ю.В. Система BEIDOU як інноваційне рішення для морської навігації: комплексний аналіз можливостей та перспектив впровадження. Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка». 2024. № 13(41). С. 875-888. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-875-888](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-875-888) URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/18189> (дата звернення: 24.01.2025).
5. Онищенко О.А., Мельник О.М., Курдюк С.В., Дрозденко О.І., Гаврилюк Т.К., Бурлаченко Д.А. Застосування методів машинного навчання для оптимізації маршрутів і завдань надводних автономних суден. Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка». 2024. № 12(40). С. 1372-1386. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386) URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/17052> (дата звернення: 24.01.2025).
6. Chen X., Ma D., Liu R. W. Application of Artificial Intelligence in Maritime Transportation. Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, No. 3. P. 439. DOI: 10.3390/jmse12030439. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/3/439> (date of access: 25.01.2025).
7. Jialun Liu, Fan Yang, Shijie Li, Yaqiong Lv, Xinjue Hu. Testing and evaluation for intelligent navigation of ships: Current status, possible solutions, and challenges. Ocean Engineering. 2024. Vol. 295. Article 116969. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.116969 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824003068> (date of access: 25.01.2025).
8. Madsen A. N., Kim T. E. A state-of-the-art review of AI decision transparency for autonomous shipping. Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping. 2024. Vol. 8, No. 1–2. DOI: 10.1080/25725084.2024.2336751. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/25725084.2024.2336751> (date of access: 25.01.2025).
9. Veitch E., Dybvik H., Steinert M. et al. Collaborative Work with Highly Automated Marine Navigation Systems. Comput Supported Coop Work. 2024. Vol. 33. P. 7–38. DOI: 10.1007/s10606-022-09450-7. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10606-022-09450-7> (date of access: 25.01.2025).
10. Horri N., Holderbaum W., Giulietti F. Challenges in the Guidance, Navigation and Control of Autonomous and Transport Vehicles. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 15. P. 6635. DOI: 10.3390/app14156635. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/15/6635> (date of access: 25.01.2025).

Hordieiev M.H. POTENTIAL AND CHALLENGES OF AI-BASED AUTOMATIC NAVIGATION AND SHIP CONTROL

This article discusses how the maritime industry is increasingly implementing autonomous navigation and ship control systems using artificial intelligence (AI) technology.

The article's purpose is to study how AI expands the capabilities of automatic navigation and ship control and analyze the elements that affect the performance and safety of autonomous shipping.

Scientific novelty. A systematic analysis of the integration of AI with automated navigation systems, including advanced object recognition, decision-making, weather forecasting, and fuel efficiency optimization, is proposed. The problems of cybersecurity, legal regulation, and adaptation of maritime infrastructure to autonomous navigation are investigated.

Results. The key components of autonomous ship navigation and their interaction with sensors and control systems are analyzed. The main technological, legal, and ethical challenges facing the introduction of AI in maritime transport are identified. Figure 1 shows the main components of autonomous ship navigation, emphasizing the integration of AI with various sensors and systems for environmental perception and decision-making. Figure 2 depicts the challenges of autonomous ship control, illustrating technological reliability, cybersecurity, legal and ethical frameworks, and the integration of AI with existing maritime infrastructure.

Conclusions. Artificial intelligence offers great opportunities for transforming maritime navigation and ship management, increasing safety, efficiency, and environmental sustainability. The introduction of artificial intelligence faces serious obstacles that require coordinated action by industry stakeholders, businesses, government agencies, and international organizations. The full implementation of autonomous navigation depends on addressing cybersecurity issues, developing legal frameworks, and training experts in AI integration. All stakeholders should work together to develop guidelines that will protect maritime operations from security risks and promote reliability alongside innovative progress.

Key words: autonomous ships, autonomous navigation, ship traffic control, artificial intelligence, navigation.

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

Мурад'ян А.О.

Одеський національний морський університет

Рукавішников П.В.

Український державний університет залізничного транспорту

Демидюков О.В.

Одеський національний морський університет

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ КРИШКИ ЛЮКА НАПІВВАГОНА, НАВАНТАЖЕНОЇ ВІД ЗЙОМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ КРІПЛЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ

Для можливості перевезень контейнерів у напіввагонах запропоновано конструкцію зйомного модуля. Даний модуль є проміжним адаптером між кузовом напіввагона та контейнером та забезпечує його надійне закріплення.

В рамках статті розглянуто особливості визначення основних показників міцності кришки люка універсального напіввагона, яка сприймає навантаження від зйомного модуля для кріплення контейнерів. Розрахунки на міцність реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation із використанням методу скінчених елементів. Просторову модель кришки люка відтворено із використанням опцій SolidWorks.

Для передачі вертикального навантаження на кришку люка на ній встановлено полосу, ширина якої дорівнює ширині профілю виконання зйомного модуля. Розрахункова модель кришки люка включає вертикальне навантаження, яке діє на полосу, що імітує поверхню опирання зйомного модуля на кришку люка, а також реакції в запірних кронштейнах на дію вертикального навантаження. Закріплення кришки люка здійснено за петлі. Враховано, що матеріал виконання кришки люка має лінійні ізотропні властивості.

При створенні скінчено-елементної моделі використано тетраедри. Оптимальну чисельність яких визначено графоаналітичним методом.

Результати проведеного розрахунку показали, що максимальні напруження виникають у петлях кришки люка і складають 115,4 МПа. Дані напруження є нижчими за допустимі. Максимальні переміщення зафіксовано у запірних кронштейнах і дорівнюють 2,61 мм. Отже міцність кришки люка з урахуванням запропонованої схеми перевезення контейнерів в напіввагоні забезпечується.

Результати проведених досліджень сприятимуть формуванню рекомендацій щодо можливості залучення напіввагонів до контейнерних перевезень та підвищенню ефективності контейнерних перевезень.

Ключові слова: транспортна механіка, кришка люка напіввагона; міцність кришки люка; напружений стан кришки люка.

Постановка проблеми. Підвищення обсягів перевезень вантажів у міжнародному сполученні викликає потребу використання контейнерів, як найбільш мобільних транспортних засобів. Їх перевезення залізницею здійснюється на вагонах-платформах. Нестача вагонів-платформ викликає необхідність пошуку альтернативних варіантів перевезень контейнерів залізницею. Одним із таких можливих варіантів є використання напіввагонів для цих цілей, що пояснюється

відсутністю даху на них та можливістю завантаження контейнерів. Однак конструкція напіввагонів не пристосована до цих цілей, що може сприяти не тільки їх пошкодженню, а і виникненню аварій. У зв'язку з цим, виникає необхідність створення рішень, спрямованих на адаптацію напіввагонів до контейнерних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для забезпечення кріплення контейнерів в напіввагонах в роботі [1] запропоновано конструкцію

зйомного модуля. Наведено обґрунтування використання зйомного модуля для кріплення контейнерів. Висвітлено результати модального аналізу кузова напіввагона, завантаженого контейнерами із урахуванням нової схеми їх взаємодії. Разом з цим, авторами не проводилося дослідження міцності кришок розвантажувальних люків, які утворюють підлогу напіввагона, з урахуванням запропонованої схеми закріплення контейнерів.

Подібні дослідження висвітлюються і в публікації [2], де для кріплення контейнерів в напіввагонах запропоновано зйомний модуль типу FLAT RACK. Авторами наведено обґрунтування конструкції зйомного модуля, а також розрахунок його на міцність. Висвітлено особливості визначення показників міцності несучої конструкції напіввагона із урахуванням перевезення в ньому контейнерів із використанням запропонованої схеми закріплення. Але автори обмежилися в своїх дослідженнях лише глухонною конструкцією напіввагона і не розглядали міцність кришки люка, навантаженої від зйомного модуля.

Для покращення міцності кришки люка напіввагона авторами публікації [3] запропоновано удосконалення її конструкції. Дане удосконалення полягає в зміні конфігурації її поясів, а також використання литих кронштейнів. Наведено результати розрахунку на міцність удосконаленої кришки люка, які підтвердили доцільність запропонованих рішень. Треба підкреслити, що при розрахунку кришки люка на міцність, авторами не враховувалися навантаження, які можуть діяти на неї від контейнерів при перевезенні їх в напіввагоні, обладнаними такими кришками люків.

Подібний недолік має і робота [4]. Авторським колективом розроблено та обґрунтовано досить цікавий з наукової точки зору концепт кришки люка із податливими зв'язками в конструкції. Запропоноване рішення сприяє зменшенню динамічний навантажень, які діють на кришку люка в експлуатації. Але було б цікаво дослідити її міцність і при навантаженні від контейнера, перевезеного в напіввагоні. Однак авторами не проводилися подібні дослідження.

В публікації [5] запропоновано кришку люка напіввагона випуклої конфігурації. Таке рішення сприяє збільшенню його вантажопідйомності. Наведено обґрунтування використання такої кришки люка. Але зазначена конфігурація кришки люка унеможливує використання напіввагона під контейнерні перевезення.

Для підвищення жорсткості кришки люка авторами публікації [6] запропоновано створення

її полотна з гофр, що мають прямокутну конфігурацію. Проведені розрахунки на міцність підтвердили доцільність зазначеного удосконалення. Однак автори не досліджували міцність кришки люка при навантаженні її від контейнера, перевезеного у напіввагоні.

Аналіз літературних джерел [1–6] показує, що питання удосконалення та дослідження міцності кришок люків напіввагонів є актуальними. Однак досі не приділялося належної уваги визначенню міцності кришки люка напіввагона при перевезенні в ньому контейнерів. Тому виникає необхідність проведення додаткових досліджень в зазначеному напрямку.

Постановка завдання. Метою дослідження є висвітлення особливостей розрахунку на міцність кришки люка напіввагона, навантаженої від зйомного модуля для кріплення контейнерів. Для досягнення зазначеної мети визначено такі завдання:

- запропонувати розрахункову модель кришки люка;
- провести розрахунок на міцність кришки люка.

Виклад основного матеріалу. З метою адаптації напіввагона до перевезень контейнерів запропоновано конструкцію зйомного модуля (рис. 1, 2) [1]. Даний модуль працює за принципом проміжного адаптера між кузовом напіввагона та контейнером та забезпечує кріплення контейнера в напіввагоні з дотриманням умов його міцності. Передбачається розміщення на підлозі напіввагона фітингових упорів (рис. 3), якими він взаємодіє із фітингами зйомного модуля, а контейнери взаємодіють зі зйомним модулем через фітингові упори, які знаходяться в кутах взаємодії повздовжніх та кінцевих балок.



Рис. 1. Розміщення контейнера в модулі

Модуль забезпечує рівномірну передачу навантаження від контейнера на кришку люка за площею його прилягання до полотна, оскільки

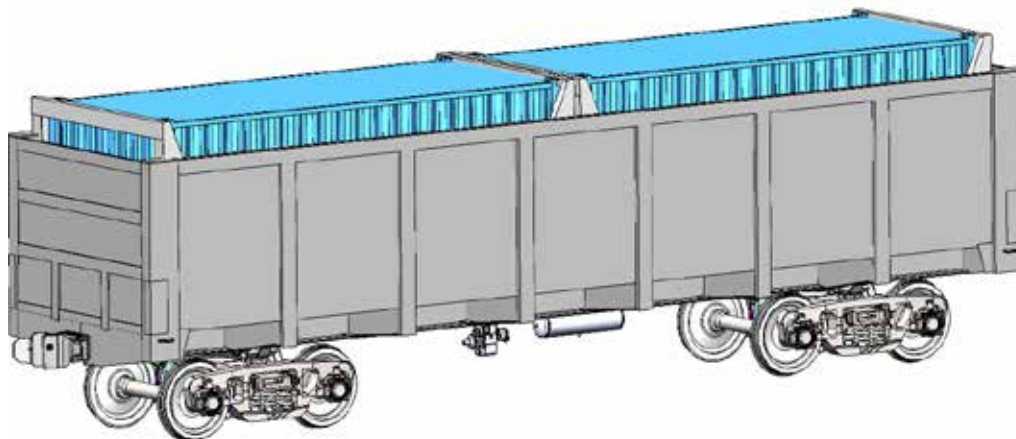


Рис. 2. Розміщення зйомних модулів з контейнерами в напіввагоні

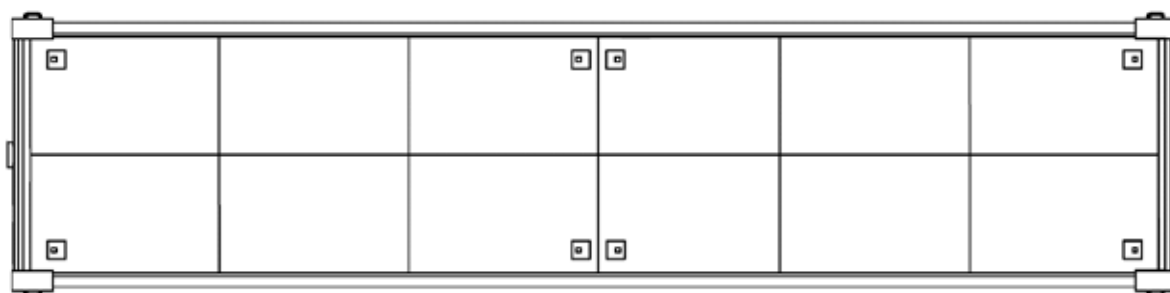


Рис. 3. Розміщення фітингових упорів в кузові напіввагона

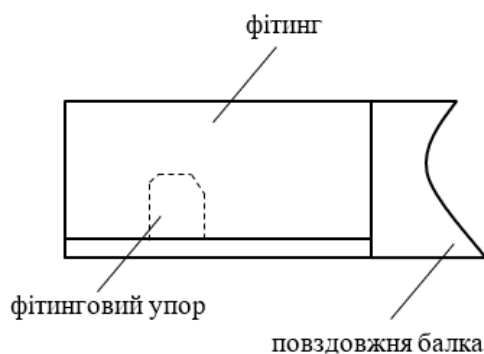


Рис. 4. Схема взаємодії фітингового упору напіввагона із фітингом зйомного модуля

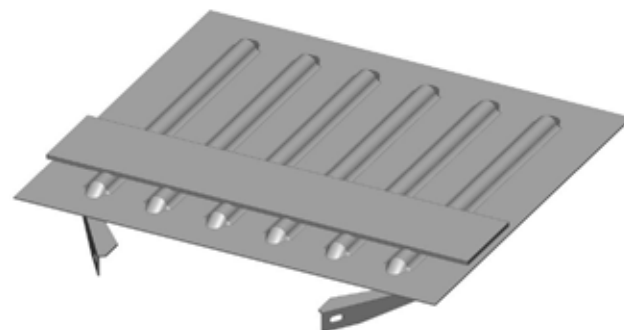


Рис. 5. Просторова модель кришки люка

фітинги зйомного модуля мають поглиблення (рис. 4). Завдяки цьому забезпечується можливість передачі навантаження від зйомного модуля за всією площею рами.

Для визначення міцності кришки люка напіввагона, навантаженої від зйомного модуля, проведено її розрахунок. При цьому застосовано метод скінчених елементів, який реалізовано в SolidWorks Simulation [7, 8]. Просторову модель кришки люка наведено на рис. 5.

Для передачі вертикального навантаження на кришку люка на ній встановлено полосу, ширина

якої дорівнює ширині профілю виконання зйомного модуля. Розрахункову схему кришки люка наведено на рис. 6. При її складанні враховано, що кришка люка сприймає вертикальне навантаження P_e , яке діє на полосу, що імітує поверхню обпирання зйомного модуля на кришку люка. Також на запірні кронштейни кришки люка діють реакції P_p на вертикальне навантаження P_e . Закріплення кришки люка здійснено за петлі. Матеріал виконання – сталь марки 09Г2С [9]. Враховано, що даний матеріал має лінійні ізотропні властивості.

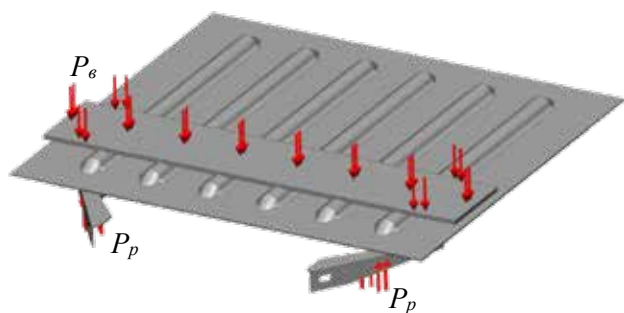


Рис. 6. Розрахункова схема кришки люка



Рис. 7. Скінчено-елементна модель кришки люка

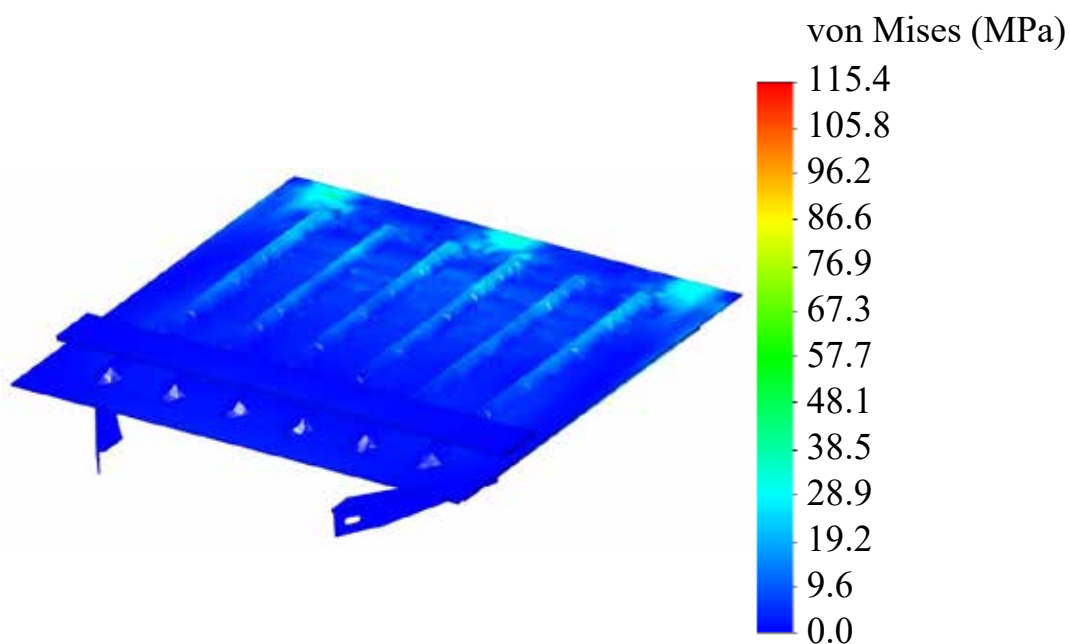


Рис. 8. Напружений стан кришки люка (вид зверху)

При створенні скінчено-елементної моделі використано тетраедри (рис. 7). Їх оптимальну чисельність визначено графоаналітичним методом. З урахуванням цього модель налічує 91556 елементів та 30477 вузлів. Максимальний розмір елементу склав 40 мм, а мінімальний – 8 мм.

Результати розрахунку наведено на рис. 8–10. З рис. 8, 9 видно, що максимальні напруження виникають у петлях кришки люка і складають 115,4 МПа, тобто є нижчими за допустимі. На рис. 10 окремо винесено найбільш навантажені зони кришки люка (позначено синім кольором).

Максимальні переміщення зафіксовано у запірних кронштейнах і складають 2,61 мм (рис. 11, 12).

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що міцність кришки люка із урахуванням запропонованої схеми закріплення контейнерів в напіввагоні дотримується.

Висновки.

1. Запропоновано розрахункову модель кришки люка, навантаженої від зйомного модуля для кріплення контейнерів в напіввагоні. Модель включає полосу, геометрія якої ідентична до геометрії опорної частини повздовжньої балки зйомного модуля. Модель враховує сили, які діють на неї від зйомного модуля: вертикальне навантаження від контейнера, а також реакції, що виникають в запірних кронштейнах на дію вертикального навантаження.

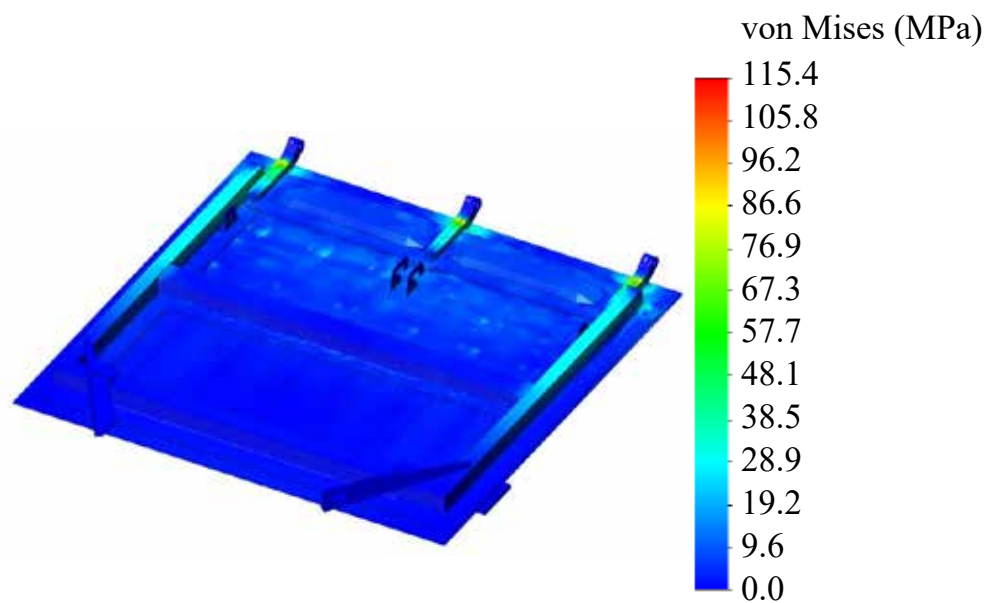


Рис. 9. Напружений стан кришки люка (вид знизу)

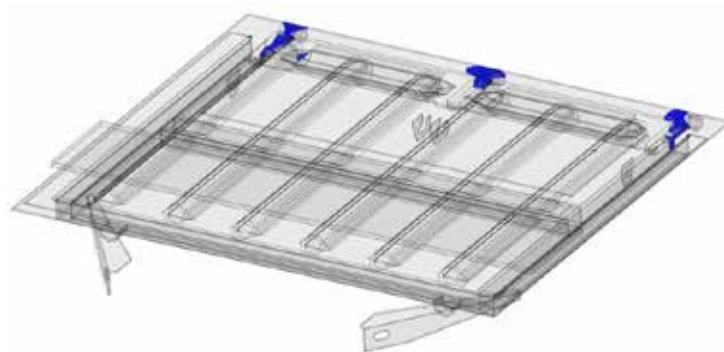


Рис. 10. Найбільш навантажені зони кришки люка

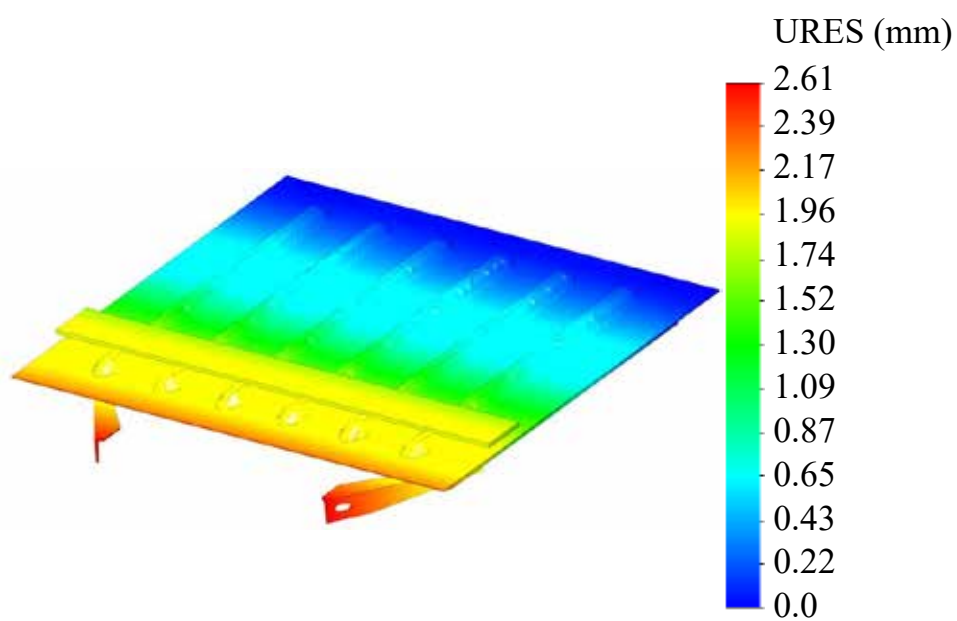


Рис. 11. Переміщення в вузлах кришки люка (вид зверху)

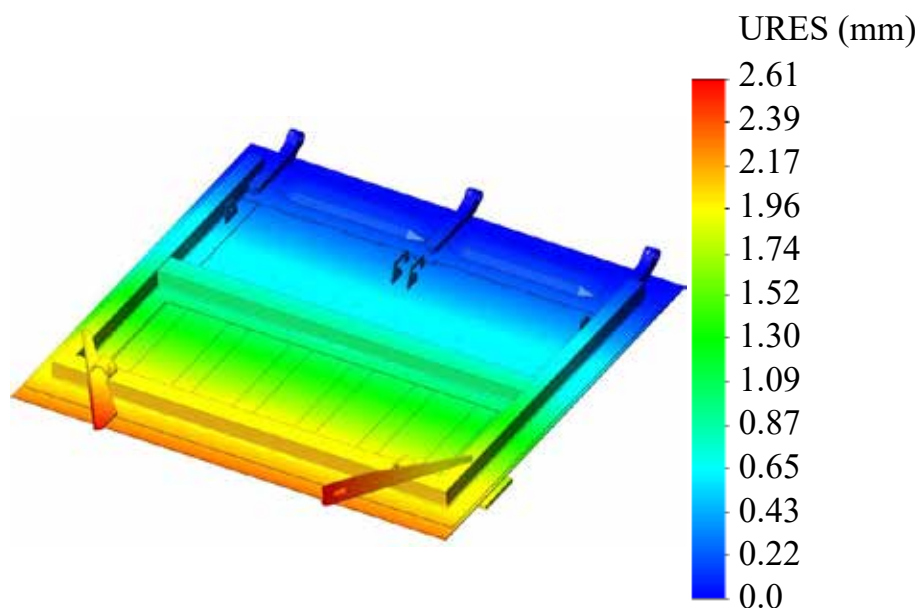


Рис. 12. Переміщення в вузлах кришки люка (вид знизу)

2. Проведено розрахунок на міцність кришки люка. Встановлено, що максимальні напруження виникають у петлях кришки люка і складають 115,4 МПа, тобто є нижчими за допустимі. Максимальні переміщення зафіксовано у запірних кронштейнах і дорівнюють 2,61 мм. Отже міцність кришки люка з урахуванням запропонова-

ної схеми перевезення контейнерів в напіввагоні забезпечується.

Результати проведених досліджень сприятимуть формуванню рекомендацій щодо можливості залучення напіввагонів до контейнерних перевезень та підвищенню ефективності контейнерних перевезень.

Список літератури:

1. Sergii Panchenko, Alyona Lovska, Arsen Muradian, Yevhen Pelypenko, Pavlo Rukavishnykov, Oleksii Demydiukov. Identifying possible ways for adapting an open wagon for transporting containers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5/7 (131). P. 6 – 14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311324>
2. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Oleksandr Kravchenko, Sebastian Solcansky. Situational adaptation of the open wagon body to container transportation. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(15), 8605. <https://doi.org/10.3390/app13158605>
3. Р. І. Візняк, І. В. Чепурченко, А. О. Яценко. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 159. С. 91 – 97.
4. Oleksij Fomin, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Mykola Gorbunov, Kateryna Kravchenko, Pavlo Prokopenko, Vladimir Hauser. The improved hatch cover construction for universal open box-type wagon from the strength and durability point of view. *Manufacturing technology*. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 216-221.
5. Denys Baranovskyi, Maryna Bulakh, Sergey Myamlin, Ivan Kebal. New Design of the Hatch Cover to Increase the Carrying Capacity of the Gondola Car. *Advances in Science and Technology – Research Journal*. 2022. Vol. 16(6). P. 186 – 191. <https://doi.org/10.12913/22998624/156205>
6. Juraj Gerlici, Alyona Lovska. Study of the strength of the open wagon hatch door with rectangular corrugations under static loads. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2024. Vol. 26, Issue 3. P. B216-B225. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.039>
7. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник. Херсон: Олді-плюс, 2018. 252 с.
8. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навчальний посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.
9. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 250 с.

Lovska A.O., Muradian A.O., Rukavishnykov P.V., Demydiakov O.V. SPECIFICS OF CALCULATION OF THE HATCH COVER STRENGTH OF AN OPEN WAGON LOADED BY A REMOVABLE MODULE FOR FIXING CONTAINERS

A design of a removable module is proposed in this research to enable the transportation of containers in open wagons. This module is an intermediate adapter between the open wagon body and the container and ensures its reliable fastening.

The article considers the specifics of determining the main strength indicators of the hatch cover of a universal open wagon, which perceives the load from the removable module for fastening containers. Strength calculations are implemented in the SolidWorks Simulation software package using the finite element method. The spatial model of the hatch cover is created using the SolidWorks software.

A strip profile is installed on it to transfer the vertical load to the hatch cover. Its width is equal to the width of the profile of the removable module. The calculated model of the hatch cover includes the vertical load acting on the strip, which simulates the support surface of the removable module on the hatch cover, as well as the reactions in the locking brackets to the action of the vertical load. The hatch cover is fastened by hinges. It was taken into account that the material of the hatch cover has linear isotropic properties.

When creating a finite element model, tetrahedra elements were used. Their optimal number was determined by the graph-analytical method.

The results of the calculation showed that the maximum stresses arise in the hinges of the hatch cover and they are of 115.4 MPa. These stresses are lower than the permissible values. The maximum displacements were recorded in the locking brackets and they are of 2.61 mm. Therefore, the strength of the hatch cover, taking into account the proposed scheme for transporting containers in an open wagon, is ensured.

The results of the research will contribute to the formation of recommendations on the possibility of involving open wagons in container transportation and increasing the efficiency of container transportation.

Key words: transport mechanics, open wagon hatch cover; hatch cover strength; stress state of the hatch cover.

Окороков А.М.

Український державний університет науки і технологій

Бех П.В.

Український державний університет науки і технологій

Лашков О.В.

Український державний університет науки і технологій

ОРГАНІЗАЦІЯ МІЖНАРОДНИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ З ВРАХУВАННЯМ РИЗИКІВ

Сучасні процеси глобалізації світової економіки сприяють формуванню складних ланцюгів поставок, які об'єднують учасників, які найчастіше розташовані на різних континентах. Ефективна організація мережі міжнародних мультимодальних перевезень стає невід'ємною умовою успішного розвитку таких взаємодій.

В останні роки спостерігається стійке зростання обсягу вантажних перевезень мультимодальним транспортом, що пов'язано зі зміцненням торговельно-економічних зв'язків між країнами. Проте організація подібних перевезень ускладнюється впливом багатьох факторів як зовнішнього, так і внутрішнього середовища. Це призводить до посилення ризиків, пов'язаних із координацією транспортних процесів та взаємодією з учасниками ринку.

Ключовими проблемами стають забезпечення безперервності та надійності перевезень, дотримання термінів доставки, мінімізація втрат та витрат. Вирішення цих завдань вимагає вдосконалення управління матеріальними потоками в міжнародних перевезеннях, що впливає на формування конкурентних переваг перевізників.

Незважаючи на наявність значної кількості наукових досліджень, присвячених управлінню ризиками в різних сферах економіки та менеджменту, недостатнє опрацювання питань управління ризиками в логістиці обмежує можливості оцінки проєктованих транспортних систем, що підкреслює актуальність обраної теми.

У статті виділено характерні ризики, що виникають під час виконання ключових логістичних операцій транспортування, проаналізовано аспекти управління ризиками у мультимодальних перевезеннях, а також розглянуто методи їх прогнозування та оцінки. Визначено основні етапи прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності та запропоновано алгоритм проєктування транспортно-логістичної системи мультимодального перевезення з урахуванням управління ризиками.

Визначення підходів до управління ризиками у процесі міжнародного мультимодального перевезення з урахуванням специфіки функціонування експедиторів, потребує розробку інноваційних пропозицій щодо управління ризиками у транспортній системі.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, ризики міжнародних перевезень, терміни доставки, транспортно-логістичні системи, управління ризиками.

Постановка проблеми. Світова економіка формує складні та розгалужені ланцюги поставок, які об'єднують учасників не лише з різних країн, а й з різних континентів та материків. Матеріальні потоки перетинають державні кордони, континенти, моря та океани. При цьому кожна територія, через яку проходить такий потік, має свої унікальні правові, економічні та географічні особливості.

Історично підприємства, що планують трансконтинентальні поставки, стикалися з безліччю завдань: укладання окремих договорів із глобаль-

ними та локальними перевізниками, оплата індивідуальних тарифів, оформлення численних товаросупровідних документів. Недостатнє знання законодавства та бізнес-практик зарубіжних країн додавало ризиків – виникали затримки вантажів, помилки у документах та штрафи за порушення термінів постачання.

Проте глобалізація економіки та торгівлі призвела до трансформації взаємодії усередині транспортної системи. Поява мультимодальних перевезень стала важливим етапом її розвитку, орієнтованим насамперед створення зручних

умов вантажовідправників. Новий формат перевезень фокусується на потребах клієнтів, знижуючи залежність від інтересів інших учасників та посередників транспортного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Правові та організаційні засади мультимодальних перевезень визначено в [1], де також закріплено право учасників мультимодальних перевезень здійснювати перевезення вантажу на підставі укладення єдиного договору та за одним перевізним документом. Визначено період відповідальності оператора мультимодального перевезення за вантаж. Скорочення простою транспортних засобів у пунктах навантаження та вивантаження в [2]. Технологія роботи транспортного полігону в [3]. Залежності витрат на функціонування транспортного вантажного комплексу від кількості виробничих ресурсів наведені в [4].

Однак, в сучасних умовах, потрібні додаткові дослідження в питаннях прогнозування та управління ризиками в транспортних системах, що плануються використовуватись для міжнародних мультимодальних перевезень.

Постановка завдання. Метою статті є визначення та впровадження новітніх методів управління ризиками в процесі міжнародних мультимодальних перевезень з врахуванням специфіки роботи перевізників чи експедиторів.

Виклад основного матеріалу. Міжнародна доставка вантажів тісно пов'язана з ефективним інформаційним обміном між усіма учасниками транспортного процесу. У сучасних умовах забезпечити якісне перевезення практично неможливо без своєчасної комунікації між відправником вантажу, оператором перевезення, представниками транспортних компаній і вантажоодержувачем.

Важливим елементом міжнародної доставки є наявність єдиного мультимодального оператора. Такий оператор координує транспортні процеси, стежить за збереженням вантажів та узгодженістю роботи всіх транспортних одиниць, що забезпечує стабільність та безперебійність системи. Клієнти зацікавлені у мінімальній наскрізній ставці, скороченні часу транзиту та максимальної надійності перевезень [2, 4].

Під час дослідження ризиків мультимодальних перевезень важливо розглянути організацію транспортування з позиції продавця та покупця вантажу. Умови доставки узгоджуються під час укладання договору купівлі-продажу, де також визначаються моменти переходу відповідальності та ризиків від продавця до покупця [1]. Неправильно вибрані умови постачання цьому етапі

можуть призвести до значних збитків, пов'язані з втратою товару чи виникненням додаткових транспортних витрат.

Процес перевалки вантажу між різними видами транспорту та передача відповідальності між контрагентами при мультимодальних перевезеннях потребує чіткого визначення точок переходу ризиків. Міжнародні правила *Incoterms* детально регулюють моменти передачі зобов'язань та розподіл можливих ризиків та витрат між продавцем та покупцем залежно від базисних умов постачання. Однак, враховуючи специфіку мультимодальних перевезень, це питання нерідко обговорюється додатково. При цьому обов'язково враховуються законодавчі вимоги країн, які застосовуються до цього виду перевезень у рамках укладеного контракту.

Визначивши ключові особливості мультимодального перевезення, можна виділити такі основні принципи її організації та функціонування:

- Принцип єдності транспортної мережі: Ефективність роботи системи залежить від її координації, за яку відповідає оператор міжнародного мультимодального перевезення.

- Принцип кооперації учасників: Взаємодія всіх сторін транспортної системи забезпечує злагодженість та надійність процесу перевезення.

- Принцип фінансово-економічного регулювання: Включає встановлення єдиних тарифних правил, а також розробку механізмів відповідальності за порушення якості послуг, що надаються.

- Принцип електронного документообігу: Забезпечує відстеження місцезнаходження вантажу, планування, керування та контроль за процесом перевезення з використанням сучасних цифрових технологій [3].

- Принцип єдиного комерційно-правового режиму: Полягає в уніфікації правил міжнародних вантажних перевезень на всіх видах транспорту для підвищення їх ефективності. Цей принцип включає спрощення митних процедур, розробку стандартних міжнародних документів для зовнішнього та внутрішнього транспортного сполучення.

Основними показниками, що відображають розподіл обсягів перевезень, є загальний обсяг транспортування та вантажообіг, який враховує як кількість перевезених вантажів, так і відстань їхнього транспортування.

Серед факторів, що перешкоджають розвитку мультимодальних перевезень, можна виділити наступні. По-перше, складні митні процедури, які нерідко стають причиною додаткових витрат

через прості транспорту та затримки вантажів. По-друге, недостатньо розвинена транспортна інфраструктура, особливо у сфері автомобільних доріг. Обмежена кількість вантажних терміналів та їх низький технологічний рівень також гальмують оптимізацію перевізного процесу. По-третє, слабкий розвиток комунікаційних та інформаційних мереж призводить до неузгоджених дій учасників транспортно-логістичної системи.

Нарешті, високий рівень фізичного та морального зношування рухомого складу стає серйозною причиною поломок транспортних засобів у дорозі, що часто призводить до зривів поставок.

У транспортних системах виділяється особливий тип ризиків – логістичні ризики, які суттєво впливають на ефективність перевізної діяльності. Вони є потенційні збитки, які під час виконання логістичних операцій різних рівнів структури логістичної системи. Формування таких ризиків пов'язане із виконанням ключових логістичних функцій: постачання, виробництва та розподілу, а також залежить від галузевої специфіки, стратегії розвитку, масштабу діяльності та інших факторів.

Таким чином, ризик – це імовірна подія, яка може призвести до збитків у виробничій, фінансовій чи іншій діяльності компанії. Його реалізація визначається не лише статистичною ймовірністю події, а й трьома ключовими факторами зовнішнього середовища:

1. Невизначеність – сукупність факторів, які можна передбачати заздалегідь, але складно оцінити їхню значущість для логістики. Причинами невизначеності можуть бути людські помилки, зміни ринкової кон'юнктури чи стихійні лиха.

2. Випадковість – обставини, що виникають під впливом зовнішніх факторів, які неможливо передбачити або оцінити їхній вплив.

3. Протидія – свідоме порушення встановлених умов учасниками логістичного процесу.

З урахуванням цих факторів ризик у сучасній логістиці перестав бути лише розрахунком можливих збитків у грошовому чи натуральному вираженні. Він став самостійним напрямом діяльності, метою якого є подолання факторів, що сприяють його виникненню.

Основні логістичні операції в перевізному процесі, що перебувають у тісному взаємозв'язку, – це підготовка вантажу до перевезення (упаковування, упакування), навантаження, подача рухомого складу під навантаження, навантаження, перевезення, зберігання вантажу в проміжних пунктах,

навантаження з одного виду транспорту на інший, експедирування вантажу тощо. Переміщення вантажу складається з цих етапів, які разом утворюють перевізний процес. Однак об'єктом ризику в мультимодальних перевезеннях може виступати не тільки вантаж, що перевозиться, але і транспортні засоби, і персонал, що бере участь у перевізному процесі й інше.

Якість управлінських рішень, вкладених у зниження ризиків під час організації мультимодальних перевезень, багато в чому залежить від обраної класифікації ризиків. Грамотне угруповання загроз за різними критеріями дозволяє систематизувати можливі проблеми, які можуть виникнути у процесі транспортування.

Помилковий вибір транспортного засобу та експедитора, неправильне визначення вантажопідйомності, маршруту прямування, а також стратегії обслуговування та ремонту рухомого складу – все це здатне призвести до втрат та збільшення витрат.

Незалежно від етапу перевезення та джерела виникнення ризиків, ключовим завданням оператора мультимодального перевезення залишається мінімізація потенційної шкоди. Досягти цього можна завдяки злагодженій взаємодії учасників транспортного процесу, застосуванню кількісних методів аналізу, прогнозуванню та прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Додатково одним із ефективних способів зниження ризиків є страхування вантажів, що дозволяє забезпечити фінансовий захист від непередбачених ситуацій.

Мультимодальні перевезення найчастіше мають міжнародний характер, що зумовлює необхідність проведення експортно-імпортних операцій. У цьому контексті особливого значення набувають не лише митні процедури оформлення вантажів, а й транспортне законодавство, а також комерційно-правові аспекти країн, через які проходять перевезення.

Принцип уніфікації комерційно-правового режиму у міжнародних мультимодальних перевезеннях включає низку заходів, що сприяють спрощенню логістичних процесів та зниженню ризиків. По-перше, вдосконалення правил перевезень (у тому числі контейнеризація) на різних видах транспорту для їхньої ефективної інтеграції та стандартизації. По-друге, спрощення митних процедур, що особливо важливо, оскільки надмірні формальності залишаються однією з ключових проблем, що гальмують розвиток мультимодальних перевезень. Вони призводять до простоїв

транспортних засобів, затримок поставок та додаткових витрат. По-третє, розробка та впровадження уніфікованої транспортної документації міжнародного формату для забезпечення ефективної роботи на зовнішньому ринку.

Крім того, діють міжнародні транспортні конвенції, які регламентують відповідальність перевізників за шкоду, заподіяну у процесі транспортування. У цих угодах визначено максимальні суми компенсацій, строки пред'явлення претензій та стягнення штрафів, а також чітко прописано межі відповідальності учасників перевізного процесу.

Управління ризиками включає моніторинг, виявлення ризиків, їх аналіз та оцінку наслідків, прогнозування можливих втрат, а також прийняття рішень щодо мінімізації або допущення цих ризиків. Важливо враховувати, що вибір між прийняттям та відмовою від ризику залежить від стратегічних цілей компанії та рівня допустимих компромісів.

При грамотному підході управління ризиками може стати інструментом отримання прибутку. Однак оператор мультимодального перевезення повинен враховувати так звані критичні ризики, наслідки яких здатні не тільки звести нанівець очікувану вигоду, а й призвести до масштабних збитків, аж до банкрутства компанії.

Процес управління ризиками є складним процесом, що складається з великої кількості етапів, алгоритм якого наведений на рис. 1.

Система управління ризиками в мультимодальних перевезеннях має базуватись на наступних ключових принципах:

- можливість вимірювання вихідних параметрів ризиків;
- надійність та точність даних, необхідних для проведення розрахунків;
- поступове та поетапне управління ризиками;
- координація дій всіх підрозділів компанії та партнерів при реалізації заходів щодо управління ризиками;
- створення та впровадження програмних рішень, адаптованих до особливостей діяльності підприємства;
- визначення та застосування специфічних для компанії показників для оцінки внутрішніх та зовнішніх ризиків.

Часто чинники, які впливають процес прийняття рішень, і навіть їх підсумкові результати, перебувають у умовах невизначеності. Це створює ризик вибору невдалого варіанта та можливих збитків. На відміну від експертних оцінок, імовірнісні методи дозволяють не тільки виявити рівень ризику, але й надати досить точний

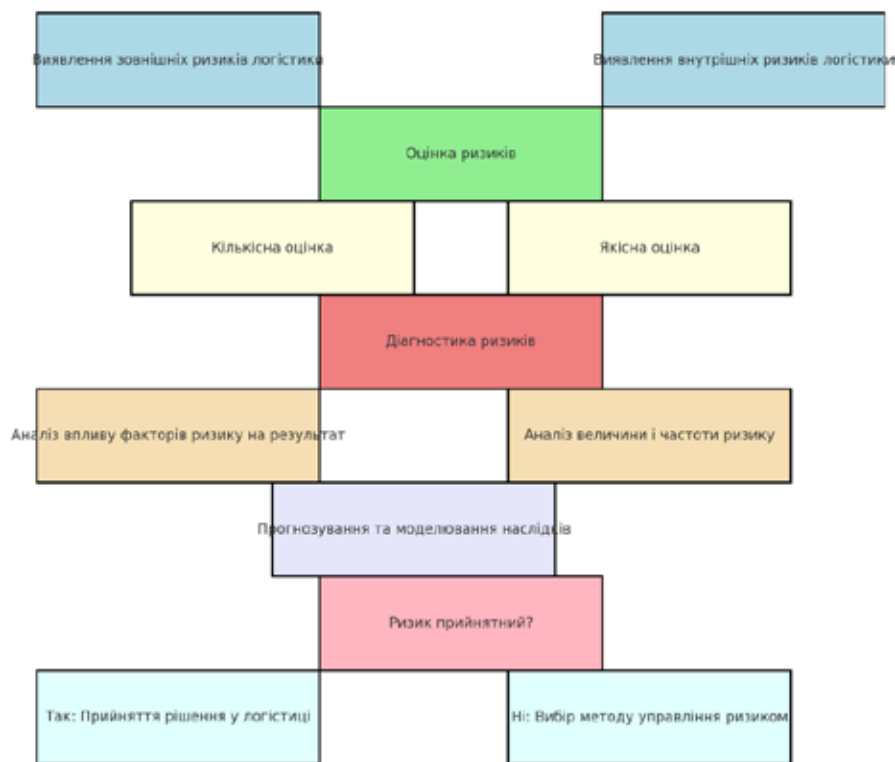


Рис. 1. Місце аналізу ризиків для прийняття управлінських рішень

прогноз, що базується на математичних розрахунках.

Критерій Лапласа. Відповідно до цього критерію всі «стани природи» є рівноймовірними. Відповідно до цього кожному стану B_i , $i = 1, n$ (при відомих стратегіях A_i , $i = 1, m$) присвоюється ймовірність p_i , що визначається за формулою:

$$p_i = \frac{1}{n} \quad p_i = \frac{1}{n}, \quad (1)$$

При цьому вихідне завдання можна розглядати як завдання прийняття логістичного рішення в умовах ризику, коли вибирається дія R_j , що дає найбільший очікуваний виграш. Середній арифметичний виграш:

$$M_i(R) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij} \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij}, \quad (2)$$

де: $M_j(R)$ – середнє арифметичне виграшу.

У випадку, якщо матриця результатів представлена матрицею ризиків, вибирається мінімальне значення, яке буде відповідати оптимальній стратегії R_j .

Критерій Вальда. Застосування даного критерію не вимагає знання ймовірностей станів B_i , а спирається на принцип найбільшої обережності, оскільки ґрунтується на виборі найкращої з найгірших стратегій R_j . Якщо вихідної матриці результат V_{ij} представляє витрати, при виборі оптимальної стратегії використовується мінімальний критерій. Для визначення оптимальної стратегії необхідно у кожному рядку матриця знайти $\max\{V_{ij}\}$, потім вибирається дія R_j , якій відповідає найменша з вибраних $\max\{V_{ij}\}$. Тобто результуючий показник $W = \min \max\{V_{ij}\}$.

Вибір критерію прийняття рішення в умовах невизначеності є складним і відповідальним етапом при проектуванні логістичних систем. Він повинен ґрунтуватися на специфіці розв'язуваної задачі, поставлених цілях та наявному досвіді. Наприклад, завдання вибору в умовах ризику та невизначеності при організації мультимодальних перевезень може вирішуватися з використанням методів теорії ігор.

Припустимо, логістичний оператор, плануючи мультимодальне перевезення, вибирає один із трьох способів доставки вантажу з порту Нідерландів на склад в Україні: повітряним транспортом, автомобільним або залізничним. При цьому прибуток перевізника відрізнятиметься в залежності від обраного способу і складатиме різні значення: $A_1 \dots A_i$ ($i=3$).

При цьому відомо, що під час перевезення можливі три стани транспортної ситуації, пов'язані

з природними умовами що визначають результативність контракту: $B_1 \dots B_j$ ($j=3$).

Таким чином, можливо дев'ять варіантів розвитку подій з доставки товару споживачеві, для яких складається матриця виграшів $\{a_{ij}\}$ та задана матриця ймовірностей виникнення тієї чи іншої транспортної ситуації в ході виконання замовлення $\{p_{ij}\}$:

$$\sum_{i=1}^n p_i \sum_{j=1}^n p_j = 1, \quad (3)$$

Для кожного сценарію математичне очікування виграшу A_i :

$$M_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot p_j, \quad (4)$$

Оптимальною стратегією вважається така, яка забезпечує найбільший середній виграш:

$$M^* = \max \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot p_j \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot p_j, \quad (5)$$

Якщо логістична компанія орієнтується не тільки на отримання прибутку, але й мінімізацію сумарних витрат під час транспортування, елементи матриці A_{ij} будуть виступати як статті витрат. То в такому разі оптимальною стратегією стає та, що забезпечує мінімальні витрати.

Таким чином, застосування теорії ігор при виборі оптимальної стратегії поведінки перевізника виправдане, коли є чітко визначені та відомі варіанти стратегій та ймовірності їх реалізації. У мультимодальних перевезеннях метод матричних ігор дозволяє вибрати найбільш ефективний маршрут, транспортний засіб, перевізника та інші ключові параметри, що сприяє зниженню ризиків та комплексній оцінці доступних альтернатив.

Висновки. Мультимодальна перевезення є складним процесом переміщення вантажів, що охоплює безліч різних аспектів, кожен з яких пов'язаний з різним за своєю природою та характером ризиком. У зв'язку з цим, мінімізація ризиків набуває особливої важливості для організацій, які активно займаються міжнародними та, зокрема, мультимодальними перевезеннями. Стоєсно мультимодальних перевезень ризик можна позначити як негативний вплив зовнішнього або внутрішнього середовища на процес перевезення вантажу, що може призвести до пошкодження вантажу, його втрати, поломки транспорту або інших подій, які можуть не дозволити оператору виконати умови договору мультимодального перевезення і можуть спричинити фінансових втрат.

Організований та синхронний інформаційний обмін між учасниками транспортного процесу,

а також паралельне функціонування матеріальних та інформаційних потоків дозволяють мінімізувати ризики та успішно реалізувати концепцію доставки «точно в строк». Впровадження сучасних інфор-

маційних систем сприяє спрощенню оформлення транспортних документів та митних процедур. Створення єдиних баз даних формує уніфікований інформаційний коридор всім учасників процесу.

Список літератури:

1. Про мультимодальні перевезення: Закон України від 17.11.2021 р. № 1887-IX. Голос України. 2021. 09 грудн. (№ 233). Із змінами, внесеними згідно із Законом № 3720-IX від 21.05.2024 р.
2. Razghonov, S., Lesnokova, I., Khalipova, N., Kuzmenko, A., Kuznetsov, V., Chernikov, D., Zvonarova, O., Prokhorchenko, H., Horulia, M., Bekh, P. Building models to optimize vehicle downtime in multimodal transportation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023, 3(3(123)), p. 68–76. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.283172>
3. Бех П.В., Стрелко О.Г., Музикін М.І., Нестеренко Г.І. Управління вантажними перевезеннями в умовах ризиків конкурентного середовища. Системи та технології (правонаступник наукового журналу «Вісник Академії митної служби України»). Серія: «Технічні науки», 2021, № 1 (61), с. 85-97.
4. Окороків А.М. Розробка методики оптимізації технічних параметрів транспортних вантажних комплексів. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 2/3 (74). С. 9–14.

Okorokov A.M., Bekh P.V., Lashkov A.V. ORGANIZATION OF INTERNATIONAL MULTIMODAL TRANSPORTATION WITH RISKS IN MIND

Modern processes of globalization of the world economy contribute to the formation of complex supply chains that unite participants, most often located on different continents. Effective organization of the international multimodal transportation network is becoming an indispensable condition for the successful development of such interactions.

In recent years, there has been a steady growth in the volume of cargo transportation by multimodal transport, which is associated with the strengthening of trade and economic ties between countries. However, the organization of such transportation is complicated by the influence of many factors of both the external and internal environment. This leads to increased risks associated with the coordination of transport processes and interaction with market participants.

The key problems are ensuring the continuity and reliability of transportation, meeting delivery deadlines, minimizing losses and costs. Solving these problems requires improving the management of material flows in international transportation, which affects the formation of competitive advantages of carriers.

Despite the presence of a significant number of scientific studies devoted to risk management in various fields of economics and management, insufficient consideration of risk management issues in logistics limits the possibilities of evaluating designed transport systems, which emphasizes the relevance of the chosen topic.

The article highlights the characteristic risks that arise during the implementation of key logistics transportation operations, analyzes aspects of risk management in multimodal transportation, and also considers methods for their forecasting and assessment. The main stages of making management decisions under conditions of uncertainty are determined and an algorithm for designing a transport and logistics system for multimodal transportation is proposed, taking into account risk management.

Determining approaches to risk management in the process of international multimodal transportation, taking into account the specifics of the functioning of freight forwarders, requires the development of innovative proposals for risk management in the transport system.

Key words: multimodal transportation, risks of international transportation, delivery times, transport and logistics systems, risk management.

УДК 629.3.014.7+629.3.022.4
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/42>

Петров Л.М.

Військова академія (м. Одеса)

Кішянус І.В.

Військова академія (м. Одеса)

Петрик Ю.М.

Військова академія (м. Одеса)

Борисенко Т.М.

ТОВ «Агенство продажу активів»

Могилянець Т.М.

Військова академія (м. Одеса)

Вернівський С.М.

Військова академія (м. Одеса)

Малиновський О.А.

Військова академія (м. Одеса)

Масліч Н.Я.

Військова академія (м. Одеса)

Шелухін С.В.

Військова академія (м. Одеса)

Нікішин В.А.

Військова академія (м. Одеса)

ТЕОРІЯ Л.М. ПЕТРОВА З ДОДАТКАМИ Ю.М. ПЕТРИКА ДЛЯ КОЛІСНОГО РУШІЯ З КІНЕМАТИЧНОЮ РОЗВ'ЯЗКОЮ

В статті Теорія Л.М. Петрова з додатками Ю.М. Петрика для колісного рушія з кінематичною розв'язкою, авторів Петрова Л.М., Кішянуса І.В., Петрика Ю.М., Борисенка Т.М., Могилянець Т.М., Вернівського С.М., Малиновського О.А., Масліч Н.Я., Шелухіна С.В., Нікішина В.А. Рух з місця вантажного автомобіля супроводжується його навантаженням гравітаційною силою в зоні плями контакту з опорною поверхнею, що може приводити до нерівного обертання шини по опорній поверхні при її деформації, а також зменшення потужності, яка передається на колісні рушії автомобілю. В статті розглянуті питання дослідження теоретичної передумови розробки колісного рушія з додатковим його навантаженням під час кочення двохмасової конструкції по диску колеса та кінематичною розв'язкою при обертанні колісного рушія з внутрішньо вбудованим механізмом для поліпшення руху в складних умовах експлуатації та створення еліпсу обертання по внутрішній поверхні колісного рушія, що дозволяє сприяти виникненню додаткового моменту, який підвищує тягові можливості.

Метою дослідження є удосконалення технологічної схеми вантажного автомобіля з вбудованим в конструкцію колісного рушія механізмом, який сприяє підвищенню тягових можливостей колісного рушія амплітудою та частотою виникнення овального руху по внутрішній поверхні, а це дозволяє передавати енергію обертального руху овального механізму через диск колеса на пляму контакту з опорною поверхнею.

Науковий та практичний напрям роботи полягає в тому, що вперше застосовано технологію при якій колісний рушій представляє собою дві маси, які при обертанні складаються по частоті та амплі-

літуді при цьому застосовано закон накопичення енергії, а це дозволяє більш доцільно підійти до розгляду реалізації крутного моменту на колісному рушії.

Методологією дослідження являлося математичне встановлення величини додаткового зусилля, яке утворюється при навантаженні ходової частини амплітудою та частотою, а це надає можливість значно підвищити динаміку руху автомобіля.

Результатом дослідження являється конструкція вантажного автомобіля колісний рушій ходової частини, в який конструктивно на маточині під'єднана додаткова прижня маса, яка навантажує внутрішню поверхню колісного рушія амплітудою та частотою коливань.

Ключові слова: амплітуда, частота, двомасова конструкція, колісний рушій, ходова частина.

Постановка проблеми. Метою дослідження є удосконалення технологічної схеми ходової частини вантажного автомобіля з конструктивним удосконаленням колісного рушія в конструкцію, якого вбудований механізм, який сприяє підвищенню тягових можливостей колісного рушія шляхом накладання амплітуди та частоти овалного механізму з рухом його по внутрішній поверхні, а це дозволяє передавати енергію обертового руху овалного механізму через диск колеса на пляму контакту з опорною поверхнею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Корейські конструктори Hyundai розробили мобільний транспортний засіб (UMV) – Elevate, що поєднує в собі технологію, яка використана в електромобілях і роботах. Рушій дозволяє йому долати місцевість, недоступну для самого сучасного позашляховика. Ходова частина – це чотири незалежні одна від одної роботизовані «ноги» (рис. 1 а, б) [1]. Концепція базується на модульній платформі EV з можливістю установки різних надбудов для кожної конкретної ситуації. Архітектура робототехнічної «ноги» така, що має п'ять ступенів свободи плюс вбудовані в маточини коліс електродвигуни. Дана конструкція унікальна, а рішення запозичені як від ссавців, так і рептилій, дозволяючи транспортному засобу пересуватися в будь-якому напрямку. У транспортному поло-

женні «ноги» концепту складають. Це дозволяє не тільки швидко переміщатися по дорогах загального користування, а й економити енергію. В екстремальних умовах руху Elevate здатний піднятися на півтораметрову висоту, переступити через півметрову розколину, пересуватися по сильно пересіченій місцевості або розставити «ноги» на ширину 4,5 метрів, зберігаючи повністю горизонтальне положення модуля з розташованими в ньому людьми. Така комбінація колісного рушія з «ногами» забезпечує нову 18 парадигму мобільності, дозволяючи отримати швидке переміщення незалежно від місцевості, при збереженні комфортного положення людей, які опинилися всередині такої машини.

Слід відмітити оригінальні конструкції колесо-подібних рушіїв, більш ранніх розробок. Так, рушій Rotoped – експериментальний всюдихід, винайдений Юліусом Макерлі (чехословацький інженер, винахідник і конструктор автомобілів) у 1958 році, складався з трубчастої повітряної кулі. Щоб рухатися розподільник роздував задні повітряні кулі, спорожняючи передні, і всюдихід рухався не за рахунок сил тертя, а під дією сили тяжіння. Відсутність крутного моменту і ковзання забезпечили хороший прогрес на м'якій землі (рис. 2) [1].

В даний час актуальними видаються рішення по розширенню можливостей колісного рушія



а



б

Рис. 1. Ходова частина незалежні одна від одної роботизовані «ноги»

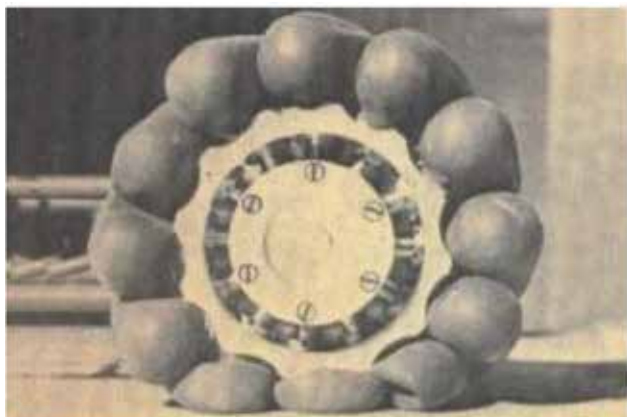


Рис. 2. Rotoped Юліуса Макерлі

для підвищення ефективності рушія транспортних засобів на воді. Для підвищення ефективності колісного рушія на плаву іноді використовують спеціальні пристрої. Наприклад, при заміні стандартного дискового колеса спеціальним, який має вбудовані або знімні лопаті, можна забезпечити додаткову тягу, так як при обертанні колеса в воді лопатєва система працює аналогічно рідинному насосу. Транспортні засоби, що мають плавучість, з класичним колісним рушієм на воді, не досягають високої ходкості від своїх коліс, тягове зусилля мале, і припускають наявність додаткового більш ефективного водоходного рушія, наприклад, водометного, гребного гвинта, як варіант – повітряного гвинта. Деякі приклади використання звичайних коліс для руху на воді наведено у додатку Б, а з використанням спеціальних водоходних рушіїв – у додатку В. Колісний рушій Shark Wheel («Колесо Акули») (рис. 3) легкового автомобіля розглядається, в тому числі, як і водохідний, оскільки володіє більшою ефективністю за рахунок зміни форми колеса [1].



Рис. 3. Автомобіль-амфібія з рушієм Shark Wheel
1 – пустотіла оболонка двокільцевого колеса; 2 – надувні елемнти Shark

Wheel – компанія, що базується в окрузі Оріндж, штат Каліфорнія США, виробляє одноімненні спіральні колеса. Форма колеса нагадує щелепу акули, яка, за словами винахідника Девіда Патрика, дала назву продукту і компанії. Замість традиційної круглої форми «Колесо Акули» складається з однієї або декількох тривимірних синусоїдальних хвиль. Форма колеса являє собою гібрид сфери і куба, набуваючи властивості обох фігур під час руху. Колеса виглядають квадратними, але обертаються плавно, як звичайні колеса. Синусоїдальні візерунки створюють більш тонку пляму контакту з дорожнім покриттям в порівнянні зі звичайним колесом такої ж ширини. Синусоїдальна конструкція забезпечує три виступи на колесо для чудового бічного зчеплення. При ковзанні виступи плавно відриваються і легко відновлюються. Компанія стверджує, що така конструкція колеса передбачає менший опір коченню і більш швидку їзду.

Постановка завдання. Ціллю статті являється винайти додатковий механізм, який сприяє підвищенню динаміці руху колісного рушія.

Виклад основного матеріалу.

На (рис. 4) представлений вантажний автомобіль з колісним рушієм з його кінематичною розв'язкою.

За основу розробки конструкції ходової частини автомобіля з накопиченням енергії на колісному рушії [2, 3, 4].

На (рис. 5) представлений колісний рушій з кінематичною розв'язкою.

На (рис. 6) представлене креслення фізикоматематичної моделі колісного рушія з кінематичною розв'язкою.

Задано рухом елементарних ваг А та М по диску колісного рушія 2 ваги А та М закріплені пружинами на маточині 5. Рух колісного рушія 2 здійснюється в напрямку дії моменту М.

Рівняння руху ваги А та М в площині диску 1 колісного рушія координатним способом і будуть мати вигляд

$$X = n \sin \frac{\pi t}{2} \quad (1)$$

$$Y = k \cos \frac{\pi t}{2} \quad (2)$$

Знайдемо рівняння траєкторії ваг А та М, виключивши з рівнянь (1) та (2) параметр часу t в нашому випадку з рівнянь (1) та (2) маємо відповідно:

$$\sin \frac{\pi t}{2} = \frac{x}{n} \quad \cos \frac{\pi t}{2} = \frac{y}{k}$$

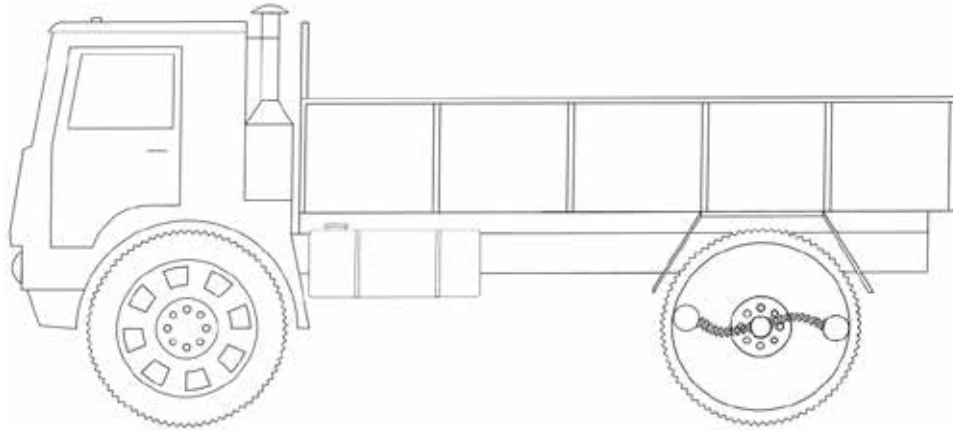


Рис. 4. Вантажний автомобіль з колісним рушієм з його кінематичною розв'язкою

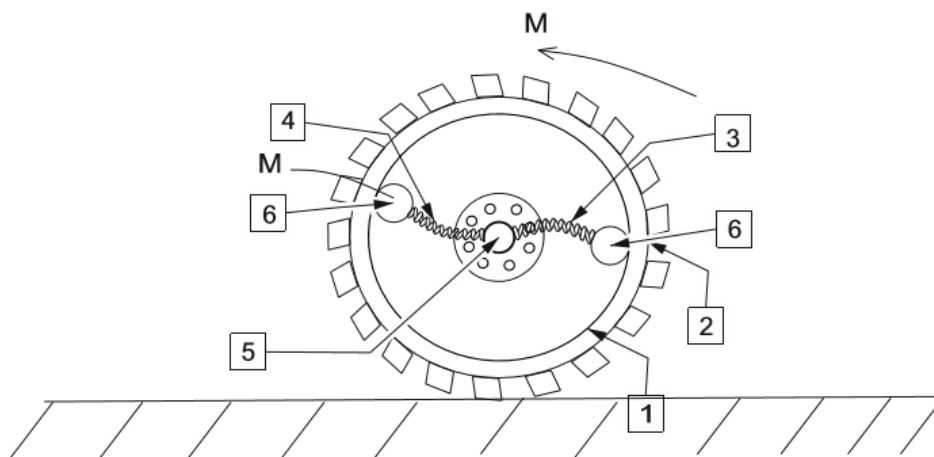


Рис. 5. Колісний рушій з кінематичною розв'язкою

1 – диск колеса; 2 – колесо; 3, 4 – пружини кінематичних розв'язки; 5 – маточина; 6 – рухливі ваги

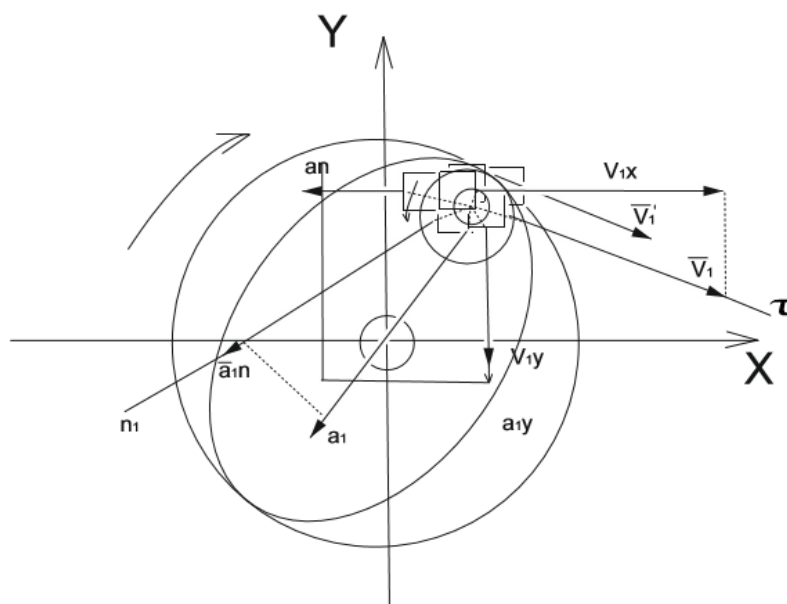


Рис. 6. Креслення фізико-математичної моделі колісного рушія з кінематичною розв'язкою

Зводимо отримані співвідношення в квадрат та після цього складаючи їх знаходимо рівняння

$$\frac{x^2}{n^2} + \frac{y^2}{k^2} = 1 \quad (3)$$

З рівняння (3) слідує, що траєкторією точок А та М являється еліпс піввісі якого рівні n та k а центр має координати маточини (O, O) . знаходимо положення точок А та М, підставляючи їх значення в рівняння (1) та (2) при:

$$t = t_0 = 0 \Rightarrow \begin{cases} x = O_0 = O \\ y = y_0 = K_M \end{cases}$$

Знаходимо положення точок при $t=t_1$ підставляючи ці значення в (1) та (2) рівняння

$$t = t_1 = \frac{1}{1 \div 10_c} \Rightarrow \begin{cases} x = X_1 = \dots N \\ y = y_1 = \dots M \end{cases}$$

Окремо від кінематики руху колісного рушія знайдемо швидкість руху точок А та М. Як відомо з теоретичних розробок при координатному способі завдання руху спочатку будемо визначати проекції швидкості на осі координат.

З рівняння руху (1) та (2) отримуємо:

$$V_x = \frac{d_x}{d_t} = \frac{d}{d_t} \left(n \sin \frac{\pi t}{2} \right) = \frac{n\pi}{2} \cos \frac{\pi t}{2} \quad (4)$$

$$V_y = \frac{d_y}{d_t} = \frac{d}{d_t} \left(k \cos \frac{\pi t}{2} \right) = \frac{k\pi}{2} \sin \frac{\pi t}{2} \quad (5)$$

З формул (4) та (5) отримуємо модуль швидкості руху точок А та М з кінематичною розв'язкою від колісного рушія:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \pi \sqrt{\frac{n^2}{4} \cdot \cos^2 \frac{\pi t}{2} + \frac{K^2}{4} \sin^2 \frac{\pi t}{2}} \quad (6)$$

На (рис. 6) приведено фізичну модель колісного рушія з кінематичною розв'язкою рухливих точок (для прикладу точки А) з точки А проводимо лінії, які паралельні осям X та Y , на яких покажемо швидкості V_{1x} та V_{1y} , які відповідають величині та знакам знайденим проекцій вектора швидкості точки А. На цих складових будемо паралелограм, діагональ якого по величині та напрямку відповідає вектору $\bar{V}_1$. При цьому вектор $\bar{V}_1$ направлений по дотичній до траєкторії в точці А та показує напрямок руху точки А по траєкторії.

Знаходимо проекції точки А використовуючи рівняння (4) та (5):

$$ax = \frac{d_x^2}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt} = -\frac{n\pi^2}{2} \sin \frac{\pi t}{2} \quad (7)$$

$$ay = \frac{d_y^2}{dt^2} = \frac{dv_y}{dt} = -\frac{k\pi^2}{2} \cos \frac{\pi t}{2} \quad (8)$$

Модуль прискорення будемо обчислювати за формулою:

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{\frac{n\pi^4}{4} \sin^2 \frac{\pi t}{2} + \frac{k\pi^4}{4} \cos^2 \frac{\pi t}{2}} = \\ &= \frac{\pi^2}{2} \sqrt{n \sin^2 \frac{\pi t}{2} + k \cos^2 \frac{\pi t}{2}} \end{aligned} \quad (9)$$

Вектор a_1 направлений в сторону вгнутості траєкторії та проходить через центр еліпса кінематичної розв'язки рухливих точок А та М.

Для визначення характеристики змінення модуля швидкості $\bar{V}$ знайдемо дотичне прискорення $\bar{a}_\tau$:

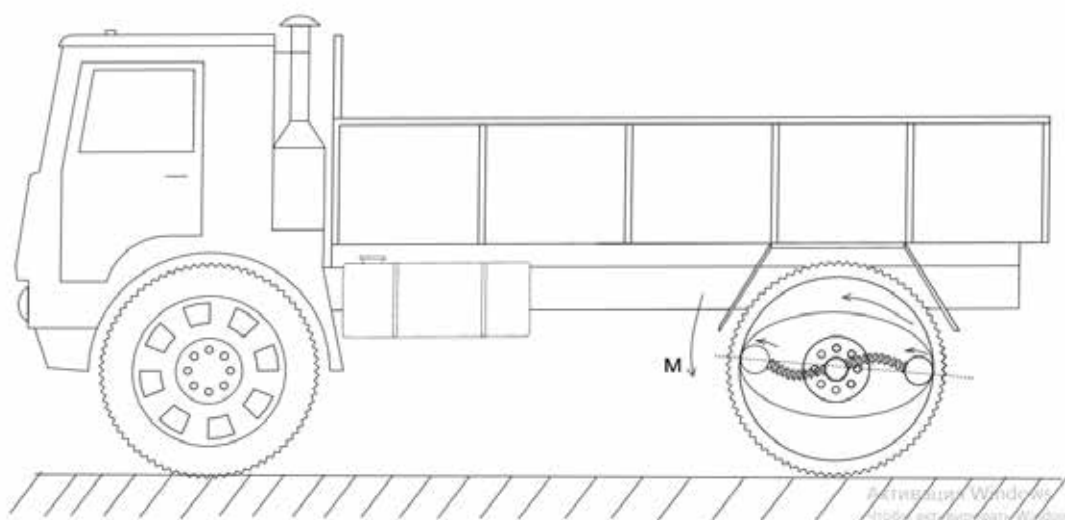


Рис. 7. Вантажний автомобіль з колісним рушієм, з кінематичною розв'язкою, при обертанні якої створюється віртуальний овальний механізм, який сприяє динаміці руху колісного рушія

$$\alpha\tau = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\pi \sqrt{\frac{n^2}{4} \cdot \cos^2 \frac{\pi t}{2} + \frac{k^2}{4} \cdot \sin^2 \frac{\pi t}{2}} \right) = \frac{\pi^2 \left(n^2 \cdot \cos \frac{\pi t}{2} + k^2 \cdot \sin \frac{\pi t}{2} \right)}{8 \sqrt{\frac{n^2}{4} \cdot \cos^2 \frac{\pi t}{2} + \frac{k^2}{4} \cdot \sin^2 \frac{\pi t}{2}}} \quad (10)$$

На (рис. 7) представлений вантажний автомобіль з колісним рушієм, який додатково отримує кочення від кінематичної розв'язки, обертання якого по внутрішній поверхні колеса, створює вір-

туальний овальний механізм, який сприяє динаміці руху колісного рушія.

Висновки.

1. В статті розглянуті теоретичні можливості підвищення динамічної рухливості вантажного автомобіля шляхом удосконалення конструкції колісного рушія.

2. Запропоновано в колісний рушій впровадити кінематичну розв'язку, яка дозволяє накопичувати енергію овалного механізму по внутрішній поверхні колеса.

3. Створена фізико-математична модель, розрахунки якої дозволили оцінити динамічну рухливість колісного рушія.

Список літератури:

1. Кубіч В. І. Особливості конструкції всюдихідних комбінованих колісних рушіїв: навчальний посібник. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 195 с.
2. Петров Л. М., Петрик Ю. М. «Елементи теорії Л. Петрова для колісного рушія з розширеним тяговим зусиллям». Військова академія (м. Одеса): Збірник наукових праць № 2 (20) 2023, с. 155–161.
3. Петров Л.М. «Спосіб удосконалення обертального руху колісного приводу автомобіля. Київ: Патент № 42929, Бюл. № 7, 2009, 1–3 с.
4. Петров Л. М. «Спосіб переміщення мобільного енергетичного засобу» Київ: Патент № 96475, Бюл. № 1, 2014, 1–3 с.

Petrov L.M., Kishianus I.V., Petryk Yu.M., Borysenko T.M., Mogilianets T.M., Verpivskyi S.M., Malinovskiy O.A., Maslich N.Ia., Shelushin S.V., Nikishyn V.A. THEORY L.M. PETROV WITH APPENDICES Yu.M. PETRYKA FOR A WHEELED MACHINE WITH A KINEMATIC CONNECTION

In the article Theory L.M. Petrova with appendices Yu.M. Petryka for a wheel drive with a kinematic solution, authors L.M. Petrov, I.V. Kishianusa, Yu.M. Petryka, T.M. Borysenko, T.M. Mogilianets, Verpivskyi S.M., Malinovskiy O.A., Maslich N.Ya., Sheluhina S.V., Nikishyna V.A. The movement of a truck from a standstill is accompanied by its loading by gravitational force in the area of the spot of contact with the supporting surface, which can lead to uneven rotation of the tire on the supporting surface during its deformation, as well as a decrease in the power transmitted to the wheel drives of the car. The article deals with the research of the theoretical prerequisites for the development of a wheel drive with its additional load during the rolling of a two-mass structure on the wheel disc and kinematic separation during the rotation of the wheel drive with an internally built-in mechanism for improving movement in difficult operating conditions and creating an ellipse of rotation on the inner surface of the wheel drive, which allows to contribute to the emergence of an additional moment that increases traction capabilities.

The purpose of the study is to improve the technological scheme of a truck with a mechanism built into the design of the wheel drive, which contributes to increasing the traction capabilities of the wheel drive by the amplitude and frequency of oval movement on the inner surface, and this allows the energy of the rotational movement of the oval mechanism to be transmitted through the wheel disc to the point of contact with the support surface.

The result of the research is the construction of a wheeled truck chassis, in which an additional ground mass is structurally mounted on the hub, which loads the inner surface of the wheeled engine with the amplitude and frequency of oscillations.

Key words: amplitude, frequency, two-mass structure, wheel drive, chassis.

Подолян В.О.

Одеський національний морський університет

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІТ-РІШЕНЬ

Транспортування людей і вантажів є основою сучасного світу, оскільки без його здійснення стає неможливою будь-яка суспільна й економічна діяльність. Ефективність транспортних процесів визначає не тільки успіх окремого бізнесу, але і цілих держав, бо входить у коло національних інтересів кожної з них. Таку ефективність здатні забезпечити ІТ-рішення, які дозволяють автоматизувати технології транспортування на різних етапах. Повна автоматизація всіх транспортних процесів здатна запропонувати суспільству автономні транспортні засоби, які цілком можуть стати одним із важливих чинників сталого розвитку в контексті забезпечення екологічної та економічної стійкості держав і окремих регіонів. У даній статті здійснено аналіз проблеми автоматизації транспортних процесів за допомогою ІТ-рішень для покращення транспортної логістики на прикладі США. Вибір на користь саме США був обумовлений особливостями цієї країни в контексті транспорту, серед яких: найбільша довжина залізничних колій; розвиненість морського транспорту завдяки географічному положенню; поганий стан і логістика громадського автотранспорту. Проведений нами аналіз дозволив виявити основні ІТ-рішення, шляхом використання яких здійснюється автоматизація, та виявити їх переваги і недоліки. На основі отриманих результатів дослідження були розроблені рекомендації щодо інтеграції розглянутих ІТ-рішень у транспортні процеси США, що відбулось через формування стратегії на основі власного алгоритму. Результати дослідження показали, що застосування ІТ-рішень з метою автоматизації транспортних процесів не завжди є потрібним, оскільки ефективність цього інструменту вища для держав з розвинутою логістикою та маршрутами, а для інших може стати занадто обтяжливою та складною в інтеграції. Перспективою наступних досліджень є порівняння автоматизації та автономізації транспортних процесів з метою виявлення конкретних особливостей останньої та пропозиції їх врахування з боку розробників ІТ-рішень.

Ключові слова: транспортування, автоматизація, транспортні засоби, ІТ-рішення, інтеграція, логістика, національні інтереси.

Постановка проблеми. Починаючи з минулого століття процеси транспортування людей і вантажів зазнали значних змін, причиною чому став розвиток науки та технологій. Якщо раніше, з самого початку існування людської цивілізації, люди покладалися на коней, вози або екіпажі для здійснення перевезень, то зараз на суші ці функції здійснює автомобільний і залізничний транспорт. Хоча морська торгівля відбувається за допомогою кораблів протягом сотень років, характер перевезень зазнав суттєвих трансформацій. З'явилися і зовсім нові засоби для транспортування вантажів і людей – літаки, які можуть здійснювати швидкісні переміщення у повітрі. Основними цілями розвитку транспорту на цьому етапі стало здешевлення та пришвидшення процесів транспортування.

В останні роки індустрія інформаційних технологій (ІТ) демонструє стрімкий розвиток та сприяє трансформації багатьох вже звичних процесів, серед яких транспортні не стали виключенням та почали активно еволюціонувати в напрямку част-

кової або повної автоматизації. Метою цієї еволюції є вже не тільки дешеве та швидке транспортування, але і забезпечення його безпеки, зручності й екологічності. Через важливість транспортування для суспільства та потребу в забезпеченні національних інтересів держав було вирішено провести огляд ІТ-рішень, які сприятимуть автоматизації транспортних процесів і надати власні рекомендації щодо їх інтеграції у США, як держави з однією з найрозвиненіших транспортних мереж у світі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання автоматизації транспортних процесів за допомогою ІТ-рішень стало предметом розгляду багатьох українських та закордонних дослідників. Серед вітчизняних науковців це питання розглянули В. Овчинніков, С. Панкратов, Т. Стовба, І. Турченко, О. Головіна, О. Головенко та інші.

У статті В. Овчиннікова та С. Панкратова наголошується, що інтеграція ІТ-технологій здатна забезпечити автоматизацію транспортних процесів у сфері залізничних перевезень [1].

Т. Стомба довела, що автоматизація транспортних процесів суден знижує споживання енергії і витрати на їх обслуговування [2].

Дослідження І. Турченка містить дані про важливість інтеграції інтелектуальних транспортних систем на основі аналізу їх використання в США та інших державах [3].

О. Головіна розглянула роль та можливості застосування засобів штучного інтелекту (ШІ) в управлінні логістикою транспорту. Цей огляд виявив, що ІТ-рішення на основі ШІ сприяють автоматизації транспортних процесів [4].

Питання використання інформаційних технологій в морському транспорті стало предметом наукової розвідки О. Головченко, яка розглянула та довела їх важливу роль у процесі автоматизації [5].

Серед закордонних дослідників, які займалися проблематикою автоматизації транспортних процесів за допомогою ІТ-рішень, можна згадати П. Хенкок, І. Нурбахш, Дж. Стюарт, Л. Айєр, Р. Чиноракі, Т. Кореджова, Д. Оладімеджі, К. Гупта, Н. Косе, К. Гюндоган, Л. Ге, Ф. Лян, С. Чунг та інші.

П. Хенкок, І. Нурбахш та Дж. Стюарт виявили майбутні особливості процесів транспортування, які спровоковані автоматизацією й автономізацією транспортних засобів [6].

Л. Айєр провів дослідження, в якому визначив ефективним застосування штучного інтелекту в галузі транспорту на шляху до побудови сталого суспільства [7].

Р. Чиноракі та Т. Кореджова здійснили аналіз впливу цифрових технологій на сферу транспортного ринку праці в контексті негативних чинників цього впливу під час транспортування [8].

Д. Оладімеджі та ін. визначили перспективність застосування технологій Інтернету речей (IoT) у здійсненні транспортних процесів [9].

С. Чунг провів комплексний огляд внесків, зроблених інформаційними технологіями в процеси покращення логістичних операцій і зростання ефективності транспортних мереж [10].

На основі проведеного огляду обраних наукових матеріалів було встановлено, що тема даного дослідження і досі залишається актуальною через жвавий інтерес, який вона викликає серед багатьох науковців, а її практичні результати можуть бути використані для підвищення ефективності транспортування. Ця стаття дозволить сформулювати власну стратегію інтеграції ІТ-рішень для автоматизації транспортних процесів у США.

Постановка завдання. Метою статті є здійснення аналізу проблеми автоматизації транспорт-

них процесів за допомогою ІТ-рішень для покращення транспортної логістики США.

Виклад основного матеріалу. Перш за все необхідно визначити значення поняття «транспортний процес». Отже, транспортний процес – це сукупність всіх дій та операцій, що реалізуються з метою переміщення товарів або людей [11]. Транспортування, як ключовий із транспортних процесів, завжди потребує спеціалізованої інфраструктури, яка будується на основі шляху переміщення. Наприклад, для автомобільного транспорту цією інфраструктурою є проїжджа частина та споруди для паркування і обслуговування. Особливістю ж морського та повітряного транспорту є те, що він потребує тільки фіксованої інфраструктури на терміналах без необхідності будівництва шляхів. Термінали, такі як аеропорти, порти та станції, є місцями, де пасажирів та вантажі можуть пересаджуватися чи бути переміщені з одного транспортного засобу або виду транспорту на інший.

Транспортний процес може складатися з багатьох операцій, але деякі з них є обов'язковими. Основні етапи транспортного процесу, які є загальними для перевезення людей і вантажів, наведено в табл. 1.

Аналізуючи дані, які наведені у Таблиці 1, стає очевидним, що транспортний процес є надзвичайно складним для супроводження та реалізації через його комплексність і одночасну відповідальність багатьох сторін, що дещо розмиває її на певних етапах. Це і стало ключовим чинником необхідності автоматизації такого складного процесу, що відбувається шляхом інтеграції ІТ-рішень на всіх його етапах. Особливості програмного забезпечення (ПЗ), яке використовується для автоматизації транспортування наведено в Таблиці 2.

Таким чином, єдиним універсальним рішенням, яке здатне працювати на пристрої фірми-перевізника та в хмарі є jSolutions, але його використання на пристрої фірми обійдеться майже вдвічі дорожчим ніж BAS. Але головним недоліком jSolutions є неможливість інтеграції цього ІТ-рішення з іншим ПЗ.

Для налагодження логістики та ланцюгів поставок як етапу планування транспортного процесу представники фірм-перевізників використовують не тільки ПЗ автоматизованого транспортування, але і клієнтські портали, CRM системи, платформи електронного навчання та спеціальні системи стеження за транспортними засобами. Використання цих ІТ-рішень засноване на тому, що ефективність та результативність логістики залежить від складу і стану парку транспортних

Таблиця 1

Основні етапи транспортного процесу

№	Назва етапу	Суть етапу
1	Планування	Здійснюється огляд розгляду поточного стану транспорту в регіоні, проектування майбутніх транспортних потреб і поєднання всього цього з елементами бюджетів, цілей та політики. Цей етап дозволяє оцінити всі чинники, від особливостей вулиць та автомагістралей до потреби використання вантажних кораблів.
2	Завантаження	Завантаження означає процес розміщення товарів на транспортному засобі, такому як вантажівка, корабель або літак, для переміщення до запланованого пункту призначення. Цей важливий етап у ланцюжку постачання передбачає ретельну організацію та захист товарів, щоб запобігти пошкодженню під час транспортування, гарантуючи, що вони прибудуть безпечно та ефективно.
3	Транспортування	За допомогою обраних транспортних засобів товар або люди переміщуються до місця вивантаження. Особливістю цього етапу є підвищена увага до забезпечення безпеки товарів або пасажирів, оскільки компанія, яка надає транспортні послуги, несе відповідальність за їх цілісність чи життя.
4	Вивантаження	Після прибуття транспорту до необхідного місця відбувається вивантаження товару чи пасажирів. На цьому етапі роботодавці повинні переконатися, що всі з'єднувачі підйомного обладнання або частини вантажу, які будуть несучими, мають достатню міцність і стійкість, щоб прийняти навантаження, спричинені підйомом.
5	Ведення документації	Перевізник зобов'язаний зберігати та архівувати транспортні документи, з метою забезпечення дотримання правових положень і законів.

Джерело: удосконалено на основі [12].

Таблиця 2

Характеристика ПЗ автоматизованого транспортування

№	Назва ПЗ	Шлях функціонування	Можливість інтеграції з іншим ПЗ	Ціна використання
1	ABM Rinkai TMS	Хмара	Наявна	Невідома
2	ANT-Logistics	Хмара	Наявна	10-15 дол. США на міс.
3	BAS	Пристрій фірми	Наявна	Більше 100 дол. США
4	jSolutions	Хмара та пристрій фірми	Відсутня	9 дол. США для окремого серверу, 15 дол. США для хмари та майже 190 дол. США для пристрою фірми
5	Rational logistics	Хмара	Наявна	Невідома
6	Qguar TMS	Пристрій фірми	Наявна	Невідома

Джерело: розроблено на основі [13]

засобів, продуктивності водіїв і їх комунікації з диспетчерами.

Перевагою використання клієнтських порталів є швидкий доступ до інформації про клієнтів та їх вимоги. У свою чергу інтегроване програмне забезпечення для управління взаємовідносинами з клієнтами (CRM) допомагає компаніям зберігати дані як про наявних, так і навіть потенційних клієнтів. Однією з найважливіших переваг використання CRM є надання логістичним компаніям можливості регулярно контактувати зі своїми клієнтами. Платформи електронного навчання спрощують навігацію співробітників системами, які складають логістичні процеси. Системи стеження за транспортними засобами надали багато можливостей для підвищення ефективності компаній, а також змінили спосіб управління логістикою багатьох з них. Здатність відстежувати місцезнахо-

дження вантажу або доставки в режимі реального часу забезпечує їм переваги перед конкурентами.

Незважаючи на велику кількість запропонованих IT-рішень, менше 40% компаній-перевізників використовують технології для контролю продуктивної ефективності ланцюгів постачання [14]. Можна зробити припущення, що така ситуація пов'язана з необхідністю витратити кошти не тільки на їх інтеграцію в діяльність перевізника, але і на підвищення технічного рівня самих працівників. Також великі витрати знижують конкурентоздатність компаній, бо негативно впливають на кінцеву ціну наданих послуг, збільшуючи її. Саме тому перед інтеграцією IT-рішень для автоматизації транспортних процесів критично важливо здійснити оцінку переваг і недоліків цього кроку.

Невеликі приватні перевізники, які надають логістичні послуги за допомогою автотранспорту,

можуть дозволити собі реалізувати цей процес за допомогою мінімальної кількості ІТ-рішень, які будуть мати обмежений функціонал (контроль запасів, управління транспортуванням, складування). Але у сфері залізничних, морських та авіаперевезень буде спостерігатися вже зовсім інша ситуація, бо вони характеризуються підвищеною небезпекою як для власних працівників, так і для оточуючих, через специфіку маршрутів та умов роботи. Через ці критичні особливості залізничні, морські та авіаперевезення вимагають додаткового контролю та мінімізації людського чинника під час їх здійснення.

Аналізуючи рівень розвиненості різних держав у контексті використання цих шляхів транспортування можна дійти висновку, що перше місце, в сукупності за цими характеристиками, займають США, оскільки саме ця держава є лідером за кількістю аеродромів, протяжністю залізничної колії та об'єму морських вантажоперевезень.

Згідно з даними уряду США, тільки з 2022 по 2023 роки значно зросла зайнятість у авіаційному (на 9,1%) та водному транспорті (на 8%) [15]. Це вказує на те, що кількість перевезень товарів і людей літаками та суднами також буде зростати, демонструючи позитивну динаміку. Збереження цього тренду є одним із важливих національних інтересів США, тому інтеграція інноваційних технологій з метою автоматизації транспортних процесів для використання в діяльності перевізників є не тільки їх клопотом, але і обов'язком уряду, а саме Міністерства транспорту США (DOT), як органу, що здійснює контроль над транспортуванням товарів.

У прийнятому 2022 року Міністерством транспорту США стратегічному плані зазначено, що його ціль полягає у «створенні провідної транспортної системи, яка обслуговує американський народ та економіку шляхом безпечного, ефективного, сталого та справедливого переміщення людей і товарів» [16]. Досягнення цієї цілі можливо тільки при інтенсивній інтеграції ІТ-рішень з метою автоматизації транспортних процесів, що має відбуватися не у вигляді окремих розрізнених кроків, а згідно з чіткою стратегією, яка враховує основні ризики та сформована на основах логіки і принципів сталого розвитку.

Однією з найефективніших і найнаочніших форм представлення певної послідовності дій є алгоритм, бо його використання не допускає хаотичності та демонструє чіткість суджень. Саме тому було створено алгоритм інтеграції ІТ-рішень у транспортні процеси США, який наведено на Рисунку 1.

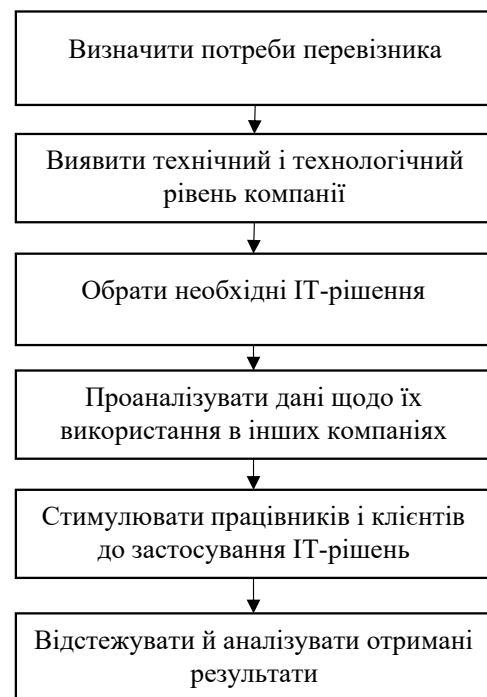


Рис. 1. Універсальний алгоритм інтеграції ІТ-рішень

Джерело: власна розробка автора

Необхідно зауважити, що для використання цього алгоритму необхідна тісна співпраця уряду США та американських перевізників, оскільки аналіз інформації експертами неможливий без передачі внутрішніх даних компаній.

Висновки. Отже, на підставі аналізу проблеми автоматизації транспортних процесів за допомогою ІТ-рішень було виявлено їх важливість для діяльності транспортних компаній і національних інтересів США. Огляд особливостей транспортного процесу дозволив визначити його, як комплексний і надзвичайно складний для реалізації без додаткових засобів автоматизації.

Стан транспортної галузі США, в контексті розвитку залізничного, морського й авіатранспорту, показав унікальність цієї держави, як провідного транспортного хабу. Також важливо зазначити, що політика уряду США щодо власної транспортної системи продемонструвала його серйозні наміри, яких неможливо досягнути без поглиблення інтеграції ІТ-рішень і подальшої автоматизації транспортних процесів. Саме це стало причиною формування власної стратегії такої інтеграції, яка була описана відповідним алгоритмом.

Перспективою наступних досліджень у цій площині є порівняння автоматизації та автономізації транспортних процесів з метою виявлення конкретних особливостей останньої для врахування зі сторони розробників ІТ-рішень.

Список літератури:

1. Овчиннікова В. О., Панкратов С. В. Діджиталізація процесу інноваційної діяльності залізничного транспорту. *Вчені записки Таврійського національного університету імені Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2019. № 30 (69). № 4. С. 25–29. URL: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/69-4-30> (дата звернення: 25.01.2025).
2. Стовба Т. Економічні та екологічні аспекти комерціалізації результатів наукових досліджень щодо морських суден. *Успіхи і досягнення у науці*. 2024. № 6 (6). С. 890–901. URL: [https://doi.org/10.52058/3041-1254-2024-6\(6\)-890-901](https://doi.org/10.52058/3041-1254-2024-6(6)-890-901) (дата звернення: 25.01.2025).
3. Турченко І. В. Пріоритетні напрями використання інформаційних технологій у сфері функціонування транспортної інфраструктури України. *Нове українське право*. 2024. № 5. С. 41–47. URL: <https://doi.org/10.51989/NUL.2024.5.5> (дата звернення: 25.01.2025).
4. Головіна О. Сучасні технології в управлінні транспортною логістикою. *International Science Journal of Management, Economics & Finance*. 2023. Т. 2, № 3. С. 35–42. URL: <https://surl.li/uzs0mc> (дата звернення: 25.01.2025).
5. Головченко О. Шляхи підвищення ефективності управління морськими перевезеннями в сучасних умовах. *Сталий розвиток економіки*. 2024. № 1 (48). С. 86–92. URL: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-48-11> (дата звернення: 25.01.2025).
6. Hancock P. A., Nourbakhsh I., Stewart J. On the future of transportation in an era of automated and autonomous vehicles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116, No. 16. P. 7684–7691. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.180577011> (дата звернення: 25.01.2025).
7. Iyer L. S. AI enabled applications towards intelligent transportation. *Transportation Engineering*. 2021. Vol. 5. Article 100083. URL: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100083> (дата звернення: 25.01.2025).
8. Chinoracky R., Corejova T. Impact of digital technologies on labor market and the transport sector. *Transportation research procedia*. 2019. Vol. 40. P. 994–1001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.139> (дата звернення: 25.01.2025).
9. Smart transportation: an overview of technologies and applications / D. Oladimeji et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 8. P. 1–32. URL: <https://doi.org/10.3390/s23083880> (дата звернення: 25.01.2025).
10. Chung S. H. Applications of smart technologies in logistics and transport: A review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. Vol. 153. P. 1–30. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102455> (дата звернення: 25.01.2025).
11. Вовк Ю.Я., Вовк І.П. Основи теорії транспортних процесів і систем : навчальний посібник (курс лекцій). Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2021. 104 с. URL: <https://surl.li/majapp> (дата звернення: 25.01.2025).
12. Транспортний процес – що це таке. *Symlog*. URL: <https://surl.li/xqphaq> (дата звернення: 25.01.2025).
13. Сиротинський О. А., Сиротинська А. П., Мельник Л. В. Автоматизація логістичної діяльності транспортних підприємств. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*. 2021. Т. 4, № 96. С. 295–304. URL: <https://doi.org/10.31713/ve4202123> (дата звернення: 25.01.2025).
14. Голубкова І., Бабаченко М., Левинська Т., Бурмака Л. Розвиток та використання іт-рішень в логістиці / С. Коляденко та ін. *Фінансово-кредитна діяльність: проблеми теорії і практики*. 2020. Т. 3, № 34. С. 230–236. URL: <https://doi.org/10.18371/fcaptr.v3i34.215518> (дата звернення: 25.01.2025).
15. Bureau of Transportation Statistics. Transportation Economic Trends: Transportation Employment. *U.S. Department of Transportation*. URL: <https://surl.li/mbjvlo> (дата звернення: 26.01.2025).
16. DOT Strategic Plan. *U.S. Department of Transportation*. URL: <https://www.transportation.gov/dot-strategic-plan> (дата звернення: 26.01.2025).

Podolian V.O. AUTOMATION OF TRANSPORT PROCESSES USING IT SOLUTIONS

Transportation of people and goods is the basis of the modern world since, without this process, any social and economic activity would have become impossible. The efficiency of transport processes determines not only the success of a separate business but also of entire states because it is within the national interests of each of them. This efficiency can be ensured by IT solutions that allow transportation to be automated at various stages. Complete automation of all transport processes can offer society autonomous vehicles, which may well become one of the essential factors of sustainable development to ensure the environmental and economic sustainability of states and individual regions. The current article analyses the automation of transport processes using IT solutions to improve transport logistics in the USA. The basis for choosing the USA was its features in the context of transport, including the largest length of railway tracks, the development of sea transport due to its geographical location, poor conditions and logistics of public transport. Our analysis allowed us to identify the leading IT solutions through which automation is carried out and their advantages

and disadvantages. Based on this, recommendations were made on integrating the considered IT solutions into the transport processes of the USA, which took place through the formation of its strategy described by the algorithm. The results of the study showed that the use of IT solutions to automate transport processes is not always necessary since the effectiveness of this tool is higher for countries with developed logistics and routes. For others, it may become too burdensome and difficult to integrate. The prospect of further research is to compare the automation and autonomization of transport processes to identify specific features of the latter and propose their consideration by the developers of IT solutions.

Key words: *transportation, automation, vehicles, IT solutions, integration, logistics, national interests.*

УДК 656.073 : 368.06
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/44>

Прокудін Г.С.

Національний транспортний університет

Мельников І.А.

Національний транспортний університет

Поляк П.К.

Національний транспортний університет

ПРОГНОЗУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ЧЕРЕЗ МИТНИЙ КОРДОН УКРАЇНИ

Дана стаття присвячена дослідженню сфери автотранспортних перевезень, а саме сучасних методів – технологій прогнозування об'ємів переміщених транспортних засобів через митний кордон України в одиницях (тис. од.). Було проведено аналітично-математичний аналіз, проаналізовано сферу перевезень автотранспортом та її сьогоденний стан та подальші перспективи, а також представлено усереднене значення за п'ятьма трендами на графіку.

В Україні за два роки повномасштабної війни майже вдвічі скоротився обсяг вантажних перевезень залізничним, автомобільним, водним, авіаційним, трубопровідним транспортом. Кількість перевезених пасажирів – автомобільним, авіаційним, залізничним та міським електротранспортом (трамваї, метро, тролейбуси) – впала майже на 40%. Для покриття потреб у експорті, Україна також вдалася до збільшення вантажних перевезень через сухопутні кордони держави, максимально наростивши пропускні можливості на західному кордоні.

Було визначено, що основною причиною/метою/напрямком використання технології прогнозування, а саме методу (прогнозування за математичними трендами) є:

- вироблення стратегії проекту на середній та довгостроковий період;
- створення/написання пропозицій щодо внесення корективів в інші підрозділи (якщо це стосується компанії) або міністерства (державний рівень) для прискорення та покращення фінальних показників;
- імплементація заходів щодо оновлення, покращення та модернізації відповідних проектів;
- математичні методи прискорюють проведення економічного аналізу, сприяють більш повного врахування впливу факторів на результати діяльності, підвищенню точності обчислень;
- впровадження диверсифікації продукту/послуги, які надає автотранспортна компанія;
- прискорення або призупинення інвестування коштів в певний регіон/галузь/підприємство.

Для виконання поставленої цілі даної статті використовується зібрана/достовірна база даних та спеціальне програмне забезпечення (наприклад додатки табличного процесора Excel та ін.).

Ключові слова: митний кордон, автотранспортні засоби, апроксимація, автотранспортні перевезення, математичне прогнозування, тренди.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день використання методів прогнозування для сфери транспортних перевезень [1], а зокрема для сфери автомобільних перевезень [2], є необхідним для побудови стратегічних планів відновлення/зростання економіки держави під час бойових дій, побудови/розвитку логістичного бізнесу або будь-якого іншого бізнес-середовища, що пов'язане з логістичними процесами [3]. Галузь автотранспортних перевезень зазвичай суттєво реагує у відповідь на зовнішні та внутрішні економічні, соціальні та політичні події (чинники). Важливість нормального функціонування транспортної

галузі складно переоцінити, адже вона робить можливою міжнародну торгівлю та забезпечує сполучення країни зі світом. А під час війни ця сфера взагалі стає критично важливою артерією, яка у разі застою може призвести до вкрай негативних наслідків. Відповідно використання елементів прогнозування є невід'ємним елементом для успішного входження в таку сферу логістики, як автомобільні перевезення, а також коректної оцінки поточного стану даної галузі з метою виявлення перспектив розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та практичні аспекти щодо логістики

вантажних перевезень та митного обслуговування в міжнародних перевезеннях в умовах воєнного стану, а також прогнозування вантажних перевезень по Україні були досліджені різними вітчизняними науковцями, серед яких Г. Прокудін, А. Капроненко, А. Дзуенко, Н. Король, В. Лебідь, Т. Хоботня, А. Назарова [4, 5]. Також слід зазначити, що для більшості процесів прогнозування за допомогою математичних трендів та апроксимації є необхідним для більш детального планування та виявлення закономірностей, що у підсумку впливає на прийняття стратегічних рішень в тій чи іншій галузі. Саме тому було обрано відповідний інструментарій, який викладено в даній статті.

Постановка завдання. Метою статті є виконати прогнозування об'ємів пропущених через митний кордон України автотранспортних засобів (значення разом на в'їзд та на виїзд) на основі статистичних даних за 2017, 2018, 2019, 2021,

2022 та 2023 роки з використанням 5-ти трендів (експоненціального, лінійного, логарифмічного, поліноміального та степеневого) на 2024 та 2025 роки, використовуючи математичний апарат, функції згладжування (апроксимації) та представити на графіку усереднене значення прогнозу за п'ятьма трендами [6].

Виклад основного матеріалу. Для виконання поставленої цілі використовується зібрана/достовірна база даних та спеціальне програмне забезпечення (наприклад додатки табличного процесора Excel та ін.). На рисунку 1 зображені етапи технології прогнозування.

В процесі прогнозування було взято статистичні дані обсягів пропущених через митний кордон України автотранспортних засобів (тис. од.) за 2017, 2018, 2019, 2021, 2022 та 2023 роки. Статистичні дані наведено в таблиці 1 (джерело – Державна Митна Служба України (статистика та реєстри) [7]).



Рис. 1. Етапи технології прогнозування

Таблиця 1

**Кількість автотранспортних засобів,
що пропущені через митний кордон України
(разом на в'їзд та на виїзд)
за 2017–2023 роки (тис. од.)**

№	Рік	Пропущено через митний кордон України автотранспортних засобів (тис. од.)
1	2017	18888,1
2	2018	17985,8
3	2019	15241,4
4	2020	6659,4
5	2021	7925,0
6	2022	7879,1
7	2023	8232,4

Проводимо розрахунки за допомогою математичного забезпечення – Excel для експоненціального, лінійного, логарифмічного, поліноміального та степеневого трендів.

Отримані результати в середовищі табличного процесора Excel представлені на рисунках 2–6.

Після чого наступним етапом стане представлення підсумкового результату прогнозування кількості автотранспортних засобів пропущених через митний кордон України використовуючи математичний апарат, функції згладжування (апроксимації) та представити на графіку усереднене значення прогнозу за п'ятьма трендами (рис. 7).

На основі прогнозованих значень по кожному тренду, розрахуємо усереднене значення на 2024–2025 роки (табл. 2).

Знаходження значень X_1 та X_2 :

$$x_1 = \frac{(5482.13 + 3330.80 + 5852.91 + 15732.16 + 6711.73)}{5} = 7421.95$$

$$x_2 = \frac{(4620.46 + 1205.90 + 5035.85 + 27985.62 + 6284.80)}{5} = 9026,53$$

На основі розрахованих даних, представимо загальне прогнозування на основі 5-х трендів (рис. 7). Н цьому графіку виділені червоним кольором прогнозовані значення обсягів пропущених через митний кордон України автотранспортних засобів на 2024–2025 роки (тис. од.).

Висновки. На основі проведеного математичного прогнозування за допомогою табличного процесора Excel з використанням 5-х трендів (експоненціального, лінійного, логарифмічного, поліноміального та степеневого), було отримано прогнозовані значення переміщення автотранспортних засобів через митний кордон України на 2024–2025 роки. Слід також зазначити, що лише поліноміальний тренд має тенденцію до зростання, але при цьому він має саму високу точність апроксимації, а саме – $R^2 = 0.8983$.

Виходячи з даного аналізу можемо припустити, що Україна буде мати позитивну динаміку зростання обсягів перевезення вантажів, а саме: 2025 рік – 121% відносно 2024 року. Також слід

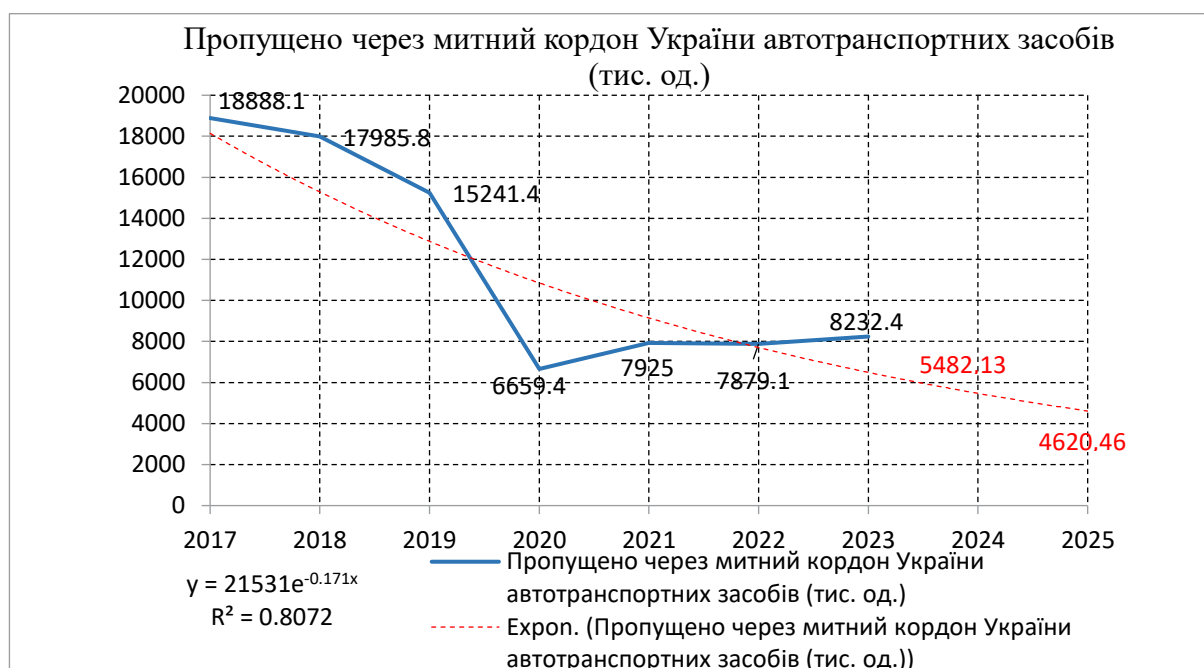


Рис. 2. Прогнозування обсягів пропущених через митний кордон України автотранспортних засобів за допомогою експоненціального тренду

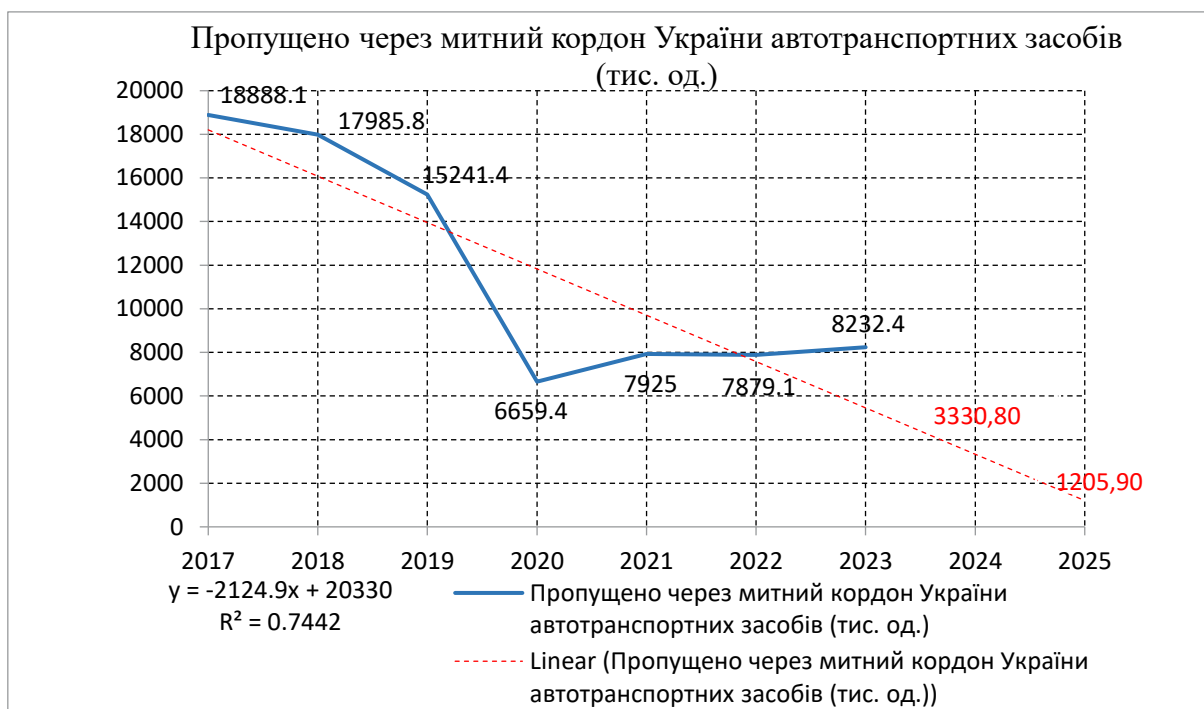


Рис. 3. Прогнозування обсягів пропущених через митний кордон України автотранспортних засобів за допомогою лінійного тренду



Рис. 4. Прогнозування обсягів пропущених через митний кордон України автотранспортних засобів за допомогою логарифмічного тренду

зазначити, що відповідно до статистичних даних [3] за десять місяців 2024 року пропущено через митний кордон України 6423,1 тис. од. Додаючи пропорційно до цієї величини значення двох останніх місяців, а саме: $6423,1 + (6423,1/10) \cdot 2$

отримує 7707,72 тис. од. Це складає 3,7% похибки прогнозування і це є більш ніж нормальним.

На основі цих даних можна зробити позитивний висновок у тому, що розвиток економіки України в сфері автотранспортних перевезень буде

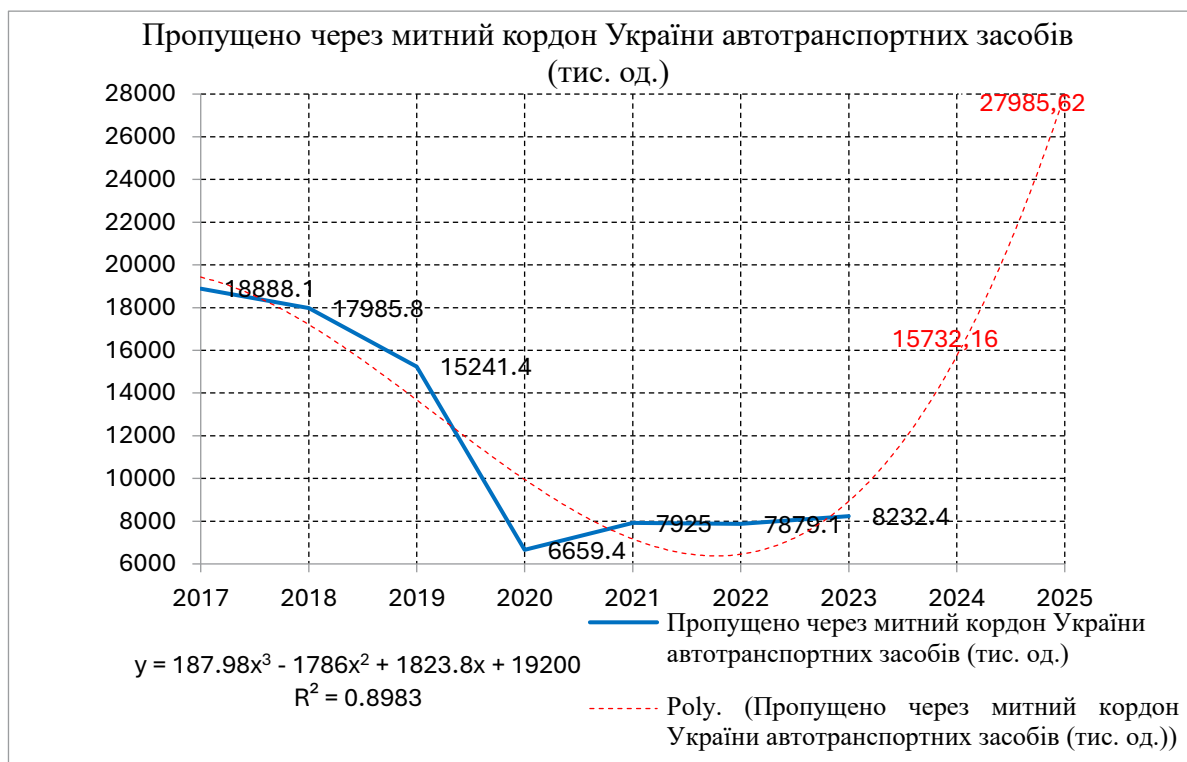


Рис. 5. Прогнозування обсягів пропущених через митний кордон України автотранспортних засобів за допомогою поліноміального тренду

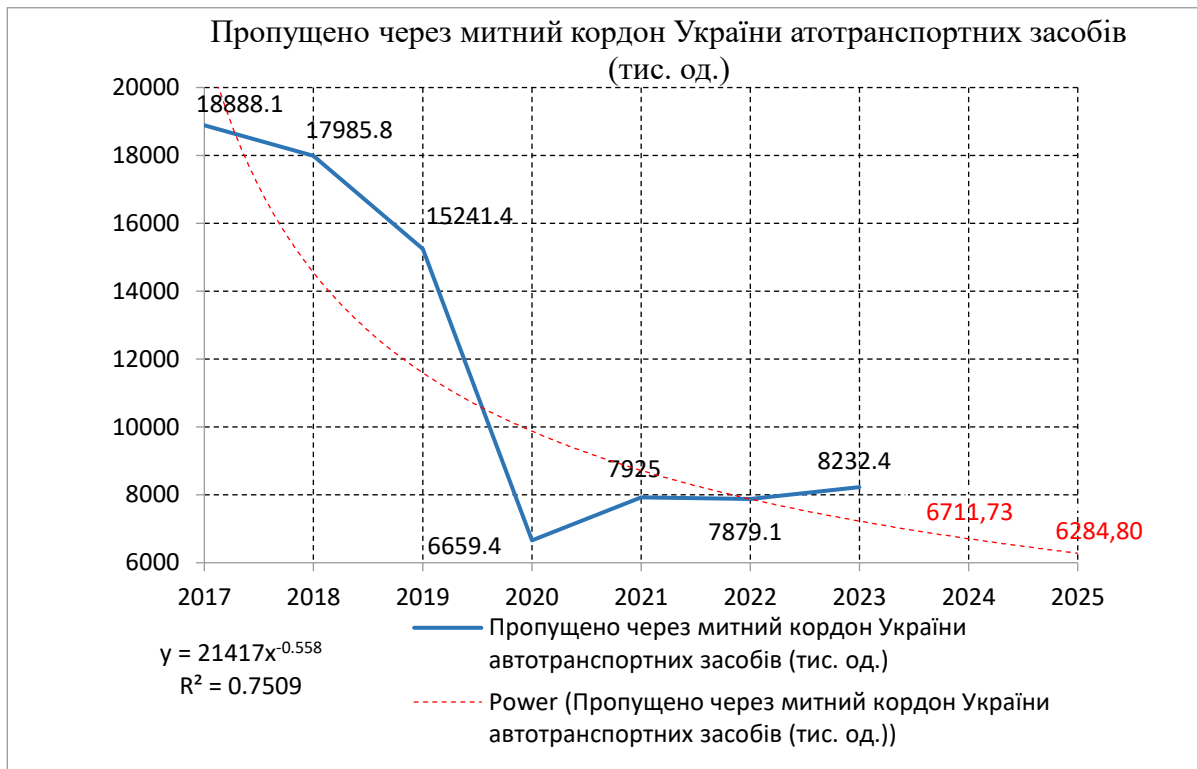


Рис. 6. Прогнозування обсягів пропущених через митний кордон України автотранспортних засобів за допомогою степеневого тренду

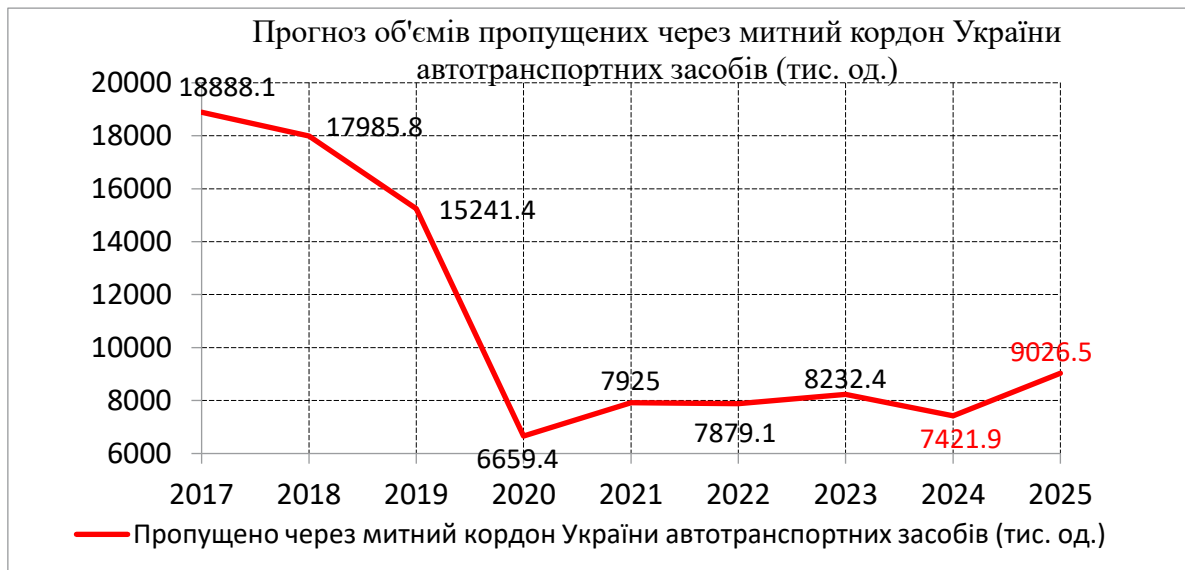


Рис. 7. Усереднене прогнозування на основі 5-х трендів

Таблиця 2

Прогноз обсягів пропущених через митний кордон України автотранспортних засобів на 2024–2025 роки (тис. од.)

№ з/п	Роки	Вихідні дані	Експоненціальна	Лінійна	Логарифмічна	Поліноміальна	Степенна
1	2017	18888.1	18146.79	18205.10	20278.00	19425.78	21417.00
2	2018	17985.8	15294.51	16080.20	15469.64	17207.44	14547.35
3	2019	15241.4	12890.54	13955.30	12656.93	13672.86	11601.79
4	2020	6659.4	10864.43	11830.40	10661.28	9949.92	9881.19
5	2021	7925	9156.77	9705.50	9113.33	7166.50	8724.36
6	2022	7879.1	7717.53	7580.60	7848.56	6450.48	7880.44
7	2023	8232.4	6504.50	5455.70	6779.22	8929.74	7230.93
8	2024	X ₁	5482.13	3330.80	5852.91	15732.16	6711.73
9	2025	X ₂	4620.46	1205.90	5035.85	27985.62	6284.80

мати позитивну тенденцію до зростання у розрізі збільшення кількості автотранспортних засобів, які будуть проходити митний кордон країни (як на в'їзд так і на виїзд). Але безумовно дану тенден-

цію ми можемо прогнозувати виключно за сприятливих зовнішніх чинників – таких як можливе припинення військових дій, приток інвестування коштів на відновлення економіки країни тощо.

Список літератури:

1. Прокудін Г.С. Проблеми організації, управління та підвищення ефективності перевезень: стан, проблеми, перспективи розвитку: монографія / за ред. Прокудіна Г.С., Савчук Л.М. Дніпро: Пороги, 2021. 300 с.
2. Олісевич М.С. Організація автомобільних перевезень: у 2-х ч.: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. Ч. 1: Вантажні перевезення. 336 с.
3. Prokudin G., Chupaylenko O., Lebid V., Denys O., Khotobnia T., Nazarova A. Logistics of freight transportation and customs service in international transportation. Logistics systems: technological and economic aspects of efficiency. Kharkiv: PC Technology Center. 2022. P. 38–74. DOI: 10.15587/978-617-7319-66-4.ch2
4. Кунда Н.Т. Організація міжнародних автомобільних перевезень: навчальний посібник для студентів напрямку “Транспортні технології” вищих навчальних закладів. К.: Видавничий Дім “Слово”, 2010. 464 с.
5. Прокудін Г.С., Прокудіна І.І., Чупайленко О.А., Ремех І.О., Майданик К.О. Підхід до організації масових перевезень вантажу на транспортних мережах. *Сучасні інформаційні та інноваційні техноло-*

гії на транспорті: матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції. MINTT-2020. (Херсон, 27-29 травня 2020 р.). Херсон: ХДМА, 2020. С. 14-17.

6. Прокудін Г.С., Капроненко А.В., Дзуенко А.О., Король Н.П. Прогнозування вантажних перевезень по Україні. *Perspectives of contemporary science: theory and practice*: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. (Львів, 14-16 жовтня 2024 р.). Львів, 2024. С. 373-379.

7. Статистика та реєстри: статистика декларування, переміщення товарів та транспортних засобів. Державна Митна Служба України. URL: <https://customs.gov.ua/en/statistika-ta-reiestri> (дата звернення: 12.12.2024).

Prokudin G.S., Melnykov I.A., Poliak P.K. FORECASTING THE MOVEMENT OF VEHICLES ACROSS THE CUSTOMS BORDER OF UKRAINE

This article is devoted to the study of the field of road transportation, namely modern methods – technologies for forecasting the volumes of vehicles moved across the customs border of Ukraine in units (thousands of units). An analytical and mathematical analysis was conducted, the field of road transportation and its current state and further prospects were analyzed, and the average value for five trends was presented on the graph.

In Ukraine, over the two years of full-scale war, the volume of freight transportation by rail, road, water, air, and pipeline transport almost halved. The number of passengers transported – by road, air, rail, and urban electric transport (trams, metro, trolleybuses) – fell by almost 40%. To cover export needs, Ukraine also resorted to increasing freight transportation across the country's land borders, maximizing throughput capacity on the western border.

It was determined that the main reason/purpose/direction of using forecasting technology, namely the method (forecasting by mathematical trends) is:

- developing a project strategy for the medium and long term;*
- creating/writing proposals for making adjustments to other units (if this applies to the company) or ministries (state level) to accelerate and improve the final indicators;*
- implementing measures to update, improve and modernize the relevant projects;*
- mathematical methods accelerate the conduct of economic analysis, contribute to a more complete consideration of the influence of factors on the results of activities, increasing the accuracy of calculations;*
- implementing diversification of the product/service provided by the transport company;*
- accelerating or suspending investment in a certain region/industry/enterprise.*

To achieve the goal of this article, a collected/reliable database and special software (for example, Excel spreadsheet applications, etc.) are used.

Key words: customs border, vehicles, approximation, road transportation, mathematical forecasting, trends.

Решетков Д.М.

Одеський національний морський університет

Коскіна Ю.О.

Одеський національний морський університет

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ – ВИМОГИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Стаття присвячена огляду та актуалізації ситуації поточних процесів реалізації заходів декарбонізації у секторі морських вантажних перевезень, які є логічним наслідком глобальних світових цілей зі зменшення викидів парникових газів у атмосферу. Судноплавство взагалі та торговельний флот зокрема залучені до вирішення проблеми екологізації морської галузі, яке реалізується у вимогах та правилах щодо декарбонізації морського флоту. У статті коротко подано цілі ІМО, проголошені з метою декарбонізації морської галузі, вказано основні «вузькі» місця їх реалізації. Подано аналіз викидів парникових газів, виходячи з типу суден та країни прапору. Досягнення цілей, проголошених ІМО відповідно до поетапних контрольних точок є проблематичним для судновласників. Перехід на альтернативні види палива, як один із способів скорочення викидів вуглецю, є доволі повільним, адже потребує значних інвестицій у модернізацію наявного флоту та врахування нових вимог при замовленнях побудови нових суден. Зазначено, що декарбонізація флоту як такого не є можливою без відповідних організаційних, технологічних та інвестиційних рішень та внесення необхідних змін у практику бункерування суден. Ситуація ускладнюється і неузгодженою юридичною базою, у зв'язку із специфікою оформлення приналежності флоту відповідно до прапору, під яким судна зареєстровані, та країною резиденції власника суден. Наголошено на важливості комплексного галузевого вирішення проблеми декарбонізації флоту. Адже судноплавні компанії не можуть досягти поставленої мети самотійно, бо це пов'язано зі швидкими та вагомими інвестиціями, розробкою уніфікованої нормативно-правової бази, розробкою та впровадженням інноваційних техніко-технологічних рішень, розширенням та посиленням горизонтальної та вертикальної співпраці між суб'єктами морського судноплавства. У зв'язку з цим відзначено ключову роль портів у реалізації заходів з декарбонізації морських перевезень. Наголошено на необхідності приєднання України до ініціатив у цієї сфері, що має бути враховано у майбутніх проєктах розвитку вітчизняного морського транспорту.

Ключові слова: декарбонізація, викиди парникових газів, морський транспорт, перевезення, судна, порти.

Постановка проблеми. Проблема екологічності морського транспорту, розробка методів та заходів щодо її вирішення останніми роками суттєво змінила фокус – забруднення нафтою, яке розглядалось основним забруднювачем морського середовища у 90-х рр. минулого сторіччя, відійшло на другий план, поступившись проблемі викидів парникових газів (далі – ПГ). Останніми десятиріччями, завдяки більшій проінформованості та розумінню проблем зміни клімату, причиною чого власне і є викиди ПГ, дещо змінився погляд на екологічність морської галузі, висунувши питання її декарбонізації на порядок денний. Цьому сприяють і розробка та впровадження численної кількості правил, які регулюють торговельне судноплавство у частині обмежень викидів ПГ в атмосферу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проголошені у [1] цілі зі стабілізації концентра-

цій парникових газів в атмосфері на такому рівні, який не допускав би небезпечного антропогенного впливу на кліматичну систему у строки, необхідні для природної адаптації екосистем до зміни клімату, мають, безумовно, міжнародний та міжгалузевий характер, що викликало неабиякий інтерес у науковців та аналітиків різних галузей економіки та виробництва, як за кордоном [2-6], так і в нашій країні [7-11].

У торговельному судноплавстві, робота якого має міжнародний характер, проблемою зниження викидів опікуються міжнародні організації та установи, зокрема Міжнародна морська організація (далі – ІМО) та Рада з торгівлі та розвитку ООН. Нормативні документи, розроблені названими організаціями, призвели до активного пошуку можливостей їх імплементації у науково-дослідній сфері. Серед публікацій останніх років,

присвячених поставленим ІМО задачам щодо декарбонізації судноплавства, шляхам їх досягнення та викликам, які постають перед галуззю, можна виділити [12-16]. Серед вітчизняних авторів проблеми декарбонізації морської галузі досліджено та викладено у публікаціях останніх років [17-20], при цьому окремі автори [наприклад, 19, 20] акцентують увагу на вирішенні проблеми декарбонізації портової діяльності, оскільки на сьогодні саме порти є найбільш розвинутим елементом морської галузі України.

Постановка завдання. Метою статті є актуалізація ситуації із декарбонізацією судноплавства, зокрема – торговельного флоту, як одного з ключових елементів морського транспорту, враховуючи сучасний стан та перспективи розвитку торговельного флоту та впливом вимог ІМО до флоту у частині зменшення викидів ПГ.

Виклад основного матеріалу. На торговельне судноплавство, яке відіграє ключову роль у забезпеченні світового торговельного обороту, перепадає біля 3% світових викидів парникових газів. Останніми роками проблема зниження викидів парникових газів у секторі торговельного судноплавства набула особливої актуальності, оскільки протягом останнього десятиріччя викиди збільшились на 20% [21], незважаючи на зниження викидів на 1 тонно-милю.

Викиди парникових газів, окрім інших факторів (інтенсивність світової морської торгівлі та відповідних обсягів морських вантажних перевезень, суттєво залежать від суден – їх типу, віку та розміру. Типи суден, які використовуються у торговельному судноплавстві, поділяють на контейнеровози та судна для перевезень масових (сухих і наливних) вантажів. Серед них судна балкерного типу, які залучаються до транспортного обслуговування сухих масових вантажів становлять 40%, частки суден для перевезень наливних вантажів

(танкери) і контейнеровозів є більше або менше однаковими (рис. 1).

Незважаючи на переважну частку балкерів, більша кількість викидів CO₂ перепадає саме на контейнеровози (рис. 2).

Якщо аналізувати кількість викидів CO₂ суднами, виходячи з країн їх володіння, то найбільша частка перепадає на судна судноплавні компанії Китаю, Греції та Японії. Це наразі не збігається із країнами, які є лідерами за кількістю та тоннажем суден, зареєстрованим під їх прапором – Ліберія, Маршалові Острови та Панама (табл. 1).

За результатами 2022 р. на судна, зареєстровані під прапорами Ліберії, Маршаллових Островів та Панами, які є лідерами за кількістю та тоннажем флоту (табл. 1) перепадало більше третини світових викидів CO₂. Регістри країн так званого «зручного прапору» надають прапори суднам фактичних власників з інших країн. У свою чергу судовласники інвестують кошти у різні типи суден, серед яких є як більше, так і менш енергоефективні, що власне і визначає рейтинг прапорів країн за викидами (рис. 3).

У цьому сенсі важливим питанням є розробка нормативно-правової бази, яка б передбачала узгоджені країнами рішення та правила, оскільки їх розрізнені вимоги можуть гальмувати отримання необхідних результатів. Саме універсальність нормативно-правової бази щодо декарбонізації флоту, яка розповсюджуватиметься на судна незалежно від прапору, країни реєстрації та/або власника тощо, забезпечать рівні умови дотримання правил та вимог.

Торговельні судна мають доволі значний термін експлуатації, тому характеризуються значним віком – багато які з них є наразі застарілими для модернізації. У той самі час, нещодавно збудовані судна, які не відповідають сучасним вимогам, є занадто молодими для утилізації. То вік

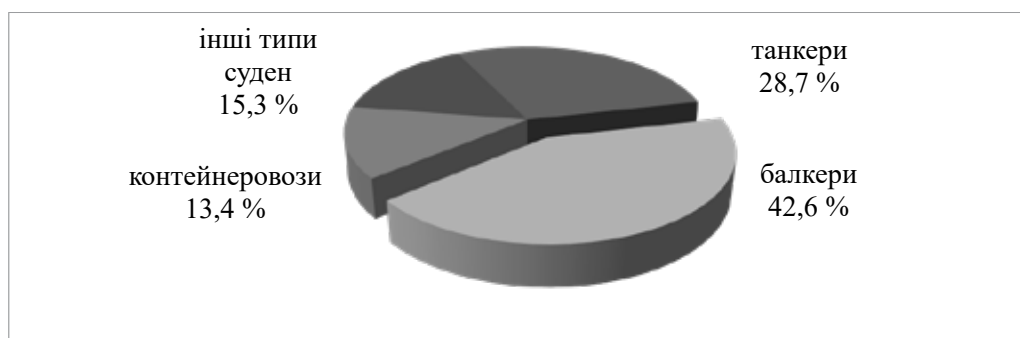


Рис. 1. Структура світового торговельного флоту за типами суден, %

Джерело: сформовано авторами за даними [22]



Рис. 2. Частка викидів CO₂ від суден різних типів (середнє значення за період 2012-2023 рр.), %
Джерело: сформовано авторами за даними [21]

Таблиця 1

Провідні прапори реєстрації суден за тонами дедвейту станом на 1 січня 2024 р.

Ранг	Прапори реєстрації	Кількість суден	Частка світової загальної ваги суден (%)	Тонни дедвейту	Частка світової загальної дедвейту в тоннах (%)	Середній розмір судна (т дедвейту)	Зростання дедвейту в тоннах 2023 до 2024 (%)
1	Ліберія	5 215	4,8	408 369	17,3	78 307	7,9
2	Панама	8 338	7,7	379 833	16,1	45 554	3,8
3	Маршаллові острови	4 273	3,9	308 501	13,1	72 198	2,9
4	Гонконг, Китай	2 487	2,3	200 378	8,5	80 570	0,0
5	Сінгапур	3 245	3,0	141 013	6,0	43 455	4,3
6	Китай	9 530	8,8	133 647	5,7	14 024	4,8
7	Мальта	1 867	1,7	102 467	4,4	54 883	-6,0
8	Багами	1 266	1,2	72 438	3,1	57 218	0,5
9	Греція	1 211	1,1	56 279	2,4	46 473	-4,5
10	Японія	5 265	4,8	43 007	1,8	8 168	3,1

Джерело: сформовано авторами за даними [21]

Таблиця 2

Розподіл торговельного флоту за віком, %

Тип суден	До 10 років	10-14 років	старше за 15 років
Балкери	71	14	15
Танкери	54	25	21
Контейнеровози	56	27	17
Універсальні	35	25	21

Джерело: сформовано авторами за даними [22]

суден торговельного флоту (табл. 2) також може у певному сенсі може стати на заваді своєчасності досягнення цілей декарбонізації по ключовим точкам.

Враховуючи світовий масштаб проблеми, ІМО приділяє значну увагу вирішенню проблеми

декарбонізації торговельного судноплавства, встановлюючи за мету – нульовий рівень викидів ПГ до 2050 р. за рахунок, зокрема, широкого впровадження альтернативних видів палива для морських суден із нульовим або близьким рівнем викидів ПГ. Досягнення такої мети фіксу-

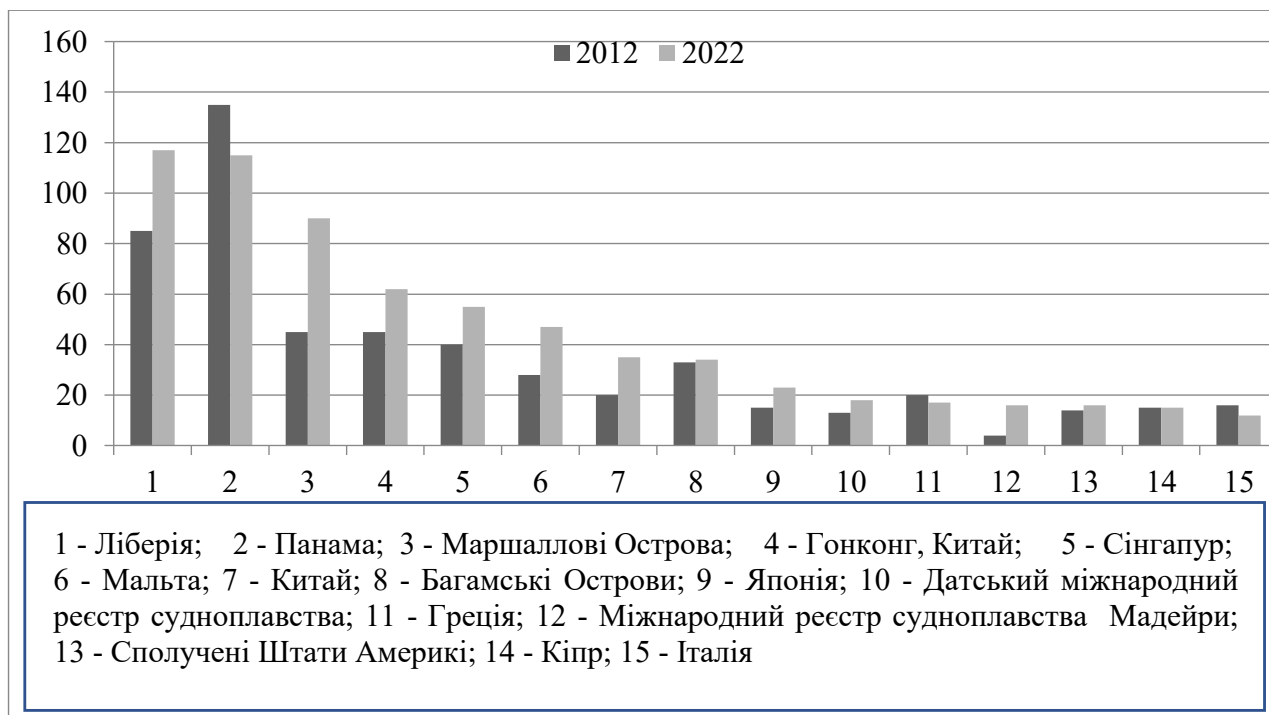


Рис. 3. Викиди вуглекислого газу за основними прапорами реєстрації суден, млн. т

Джерело: сформовано авторами за даними [21]

ється контрольними точками: до 2030 р. – зменшення викидів до 20-30% порівняно із 2008 р., до 2040 р. – до 70-80% порівняно із 2008 р.

Виконання таких завдань наразі є доволі складним з точки зору судновласників-операторів торговельного флоту. Дотримання вказаних вимог ІМО покладається на країни прапору, у той час як інвестиційні рішення щодо замовлення на побудову нового тоннажа (або переобладнання існуючого), що власне і визначає рішення щодо типу двигунів та палива, ухвалюються фактичними власниками суден. Досягнення цілей з поступового звниження викидів ПГ означає і низку рішень операційного характеру, які впливатимуть на комерційну складову діяльності судноплавних компаній, зокрема – маршрути виконання рейсів та швидкість руху суден на переходах.

Перехід на альтернативні види палива знаходиться на початковому етапі. Проголошені ІМО вимоги щодо декарбонізації суден передбачають, що на контрольну точку 2030 р. паливо із низьким рівнем викидів має становити 5% загального споживання палива. На сьогодні наразі використання альтернативних видів палива (здебільшого – скраплений природний газ, у меншому ступені – акумуляторні батареї, метанол та скраплений нафтовий газ) трохи перевищують 1%, у той час як 99%

суден торговельного флоту працюють на традиційних сортах палива. Тим не менш, судноплавні компанії, розміщаючи на суднових верфях замовлення на побудову суден, вархують вимоги ІМО: більше 20% замовлених суден призначені для роботи саме на альтернативному паливі, що свідчить про певний рост попиту на судна, більш екологічні, ніж традиційні.

Вимоги ІМО створюють певні складнощі і для суднобудівництва, адже потужності верфей обмежені як високими цінами на будівництво/переобладнання суден, так і тривалим часом очікування як побудови, так і переобладнання суден. Встановлені ІМО вимоги означають для верфей, що до 2050 р. мають будуватися та/або переобладнюватися біля 3500 суден щороку. Однак кількість верфей за останні 15 років зменшилась, а пік побудови суден склав 2700 одиниць (2010 р.). Викладене може спровокувати складну ситуацію із існуючим флотом, який не потрапляє під оновлення відповідно до вимог ІМО щодо палива – адже вони потребуватимуть більшого часу на виконання звичайних ремонтних робіт.

Відповідно до змін у технічній експлуатації суден, обумовлених вимогами щодо використання палива, щоб забезпечувати мінімізацію викидів ПГ, мають досконалюватися і бункерувальні тех-

нолоїї. За орієнтовними оцінками фахівців галузі [21], інвестиції у модернізацію бункерувальної інфраструктури і досконаленні бункерувальних технологій потребуватимуть навіть більших інвестицій, ніж інвестиції у флот: досягнення нульових викидів до 2050 р. потребуватиме від 28 до 90 млрд. дол. США на рік. У цьому контексті особливого значення набувають і морські порти, які можуть стати пунктами зберігання та доставки альтернативного суднового палива, за їх забезпечення необхідним бункерувальним обладнанням.

Однією з таких ініціатив є «Зелений та цифровий судноплавний коридор Роттердам-Сінгапур», створений у 2022 р. Ця ініціатива охоплює такі зацікавлені сторони, як судноплавні компанії, портові адміністрації та оператори, постачальники палива, паливні коаліції та асоціації, банки та навчальні заклади. На сьогоднішній день вона об'єднує 26 партнерів і спрямована на реалізацію кількох експериментальних проєктів та тестування комерційних структур з метою прискорення впровадження палива з нульовим та близьким до нуля рівнем викидів, такого як синтетичні та біологічні варіанти метанолу, аміаку, метану та водню. У рамках ініціативи «Зелене судноплавство», що стартувала у 2022 р., країни та партнери з приватного сектору співпрацюють з таких питань, як розробка маршрутів «зелених коридорів», проведення техніко-економічних досліджень щодо освоєння відновлюваних джерел енергії для суден та пов'язаних з енергетикою технологій, розробка нормативних положень та модернізація суден.

Порти у регіонах «зелених коридорів» тісно співпрацюють із судноплавними компаніями, щоб створити необхідну інфраструктуру для екологічно чистих видів палива, таких як водень, аміак та біопаливо. Ці зусилля мають вирішальне значення для створення стійкої галузі морських перевезень, здатної відповідати майбутнім екологічним стандартам та скоротити свій вуглецевий слід.

Висновки. Україні, яка прагне підвищити продуктивність та конкурентоспроможність на міжнародному рівні, у тому числі – і на ринку міжнародних морських перевезень, необхідно буде заздалегідь розробити дорожню карту та забезпечити необхідні ресурси, а також розробити числену кількість правил, які регулюють морську галузь загалом та торговельне судноплавство зокрема у частині обмежень викидів ПГ у атмосферу. Визначення таких пріоритетів та робота щодо їх реалізації саме зараз дуже важлива, оскільки Україна, як і ЄС, проходить етап значних змін, але пріоритети довгострокових проєктів мають сприяти розвитку вітчизняного морського флоту. Отриманий у результаті аналізу теорії та практики декарбонізації сектору морських перевезень перелік рушійних сил, проблем, переваг та недоліків сприяє розумінню основних аспектів, які необхідно враховувати у майбутніх проєктах розвитку морського транспорту в Україні. Україні необхідно рішуче сприяти розвитку морського транспорту з нульовими викидами та брати активну участь у світових заходах у цьому напрямку.

Список літератури:

1. Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text
2. Gailani A., Cooper S., Allen S. Pi A., Taylor P., Gross R. Assessing the potential of decarbonization options for industrial sectors. *Joule*. Vol. 8, Iss. 3. 2024. P. 576–603. DOI: 10.1016/j.joule.2024.01.007
3. Triani M. Overview of the Decarbonization Options for the Electricity Sector: Opportunities and Challenges. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 2023. 1248(1):012004 DOI:10.1088/1755-1315/1248/1/012004
4. Fleiter T., Herbst A., Rehfeldt M., Arens M. Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. URL: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-07/industrial_innovation_part_2_en.pdf
5. High-Emitting Sectors: Challenges and Opportunities for Low-Carbon Suppliers. Insight Report September 2024. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_High_Emitting_Sectors_Challenges_and_Opportunities_for_Low_Carbon_Suppliers_2024.pdf
6. Rajabloo T., De Ceuninck W., Van Wortswinkel L., Rezakazemi M., Aminabhavi T. Environmental management of industrial decarbonization with focus on chemical sectors: A review. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 302, Part B. Article 114055. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114055>
7. Декарбонізація української енергетики (економіки): вплив російської агресії, амбітні цілі та потенційні можливості для України в післявоєнний період. URL: <https://razumkov.org.ua/images/2022/10/26/2022-Decarbonisation.pdf>
8. Гнедіна К.В., Сорока А.В. Декарбонізація економіки як чинник забезпечення кліматично нейтрального майбутнього: сучасні виклики і перспективи в Україні та світі. *Економіка та суспільство*. 2023.

Вип. 54. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-54-76>. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2804>

9. Теоретико-прикладні аспекти декарбонізації та розвитку розподіленої електроенергетики України : кол. моногр. / за ред. М. О. Кизима ; авт. кол. : М. О. Кизим, В. Є. Хаустова, В. В. Шпілевський, Є. І. Котляров, Т. І. Салашенко, Є. М. Крячко, Є. С. Колбасін, Д. М. Костенко, О. В. Шпілевський, О. В. Лелюк, Г. В. Мілютін. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2020. 344 с.

10. Гринюк О. Ідентифікація ризиків декарбонізації нафтогазової галузі. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022, № 4. С. 185-191. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-308-4-29>

11. Гура К.Ю., Петрук В.Г. Аналіз сучасних тенденцій декарбонізації та екомодернізації енергетики України і світу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 5. с 19-26. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-19-26>

12. Wan, Z., el Makhoulfi, A., Chen, Y., & Tang, J. Decarbonizing the international shipping industry: Solutions and policy recommendations. *Marine Pollution Bulletin* 2018. Vol. 126, p. 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.064>

13. Wu, M., Li, K.X., Xiao, Y., & Yuen, K.F. (2022). Carbon Emission Trading Scheme in the shipping sector: Drivers, challenges, and impacts. *Marine Policy*. 2022. No 138. Article 104989. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.104989>

14. Zanobetti F., Pio G., Jafarzadeh S., Munoz Ortiz M., Cozzani V. Decarbonization power systems of maritime transport: Sustainability assessment of alternative. *Journal of Cleaner Production*. 2023. No 417. Article 137989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137989>

15. Trivyza, N.L., Rentizelas, A., Theotokatos, G. Decision support methods for sustainable ship energy systems : a state-of-the-art review. *Energy*. 2022. Vol. 239, Article 122288. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122288>

16. Karaš A.: Smart Port as a Key to the Future Development of Modern Ports. *TransNav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2020. Vol. 14, No. 1, pp. 27-31. <https://doi.org/10.12716/1001.14.01.01>

17. Onishchenko O., Golikov, V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 116. p. 223-235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>

18. Yeremenko K. International Maritime Organization and Decarbonization of Maritime Industry: Mandate and Instruments. *Lex Portus*. 2022. Vol. 8(3). P. 30–57. <https://doi.org/10.26886/2524-101X.8.3.2022.2>

19. Решетков Д.М., Павлова Н.Л. Глобальні ініціативи щодо декарбонізації морського транспорту. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33 (72) № 5 2022. С. 312-317. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/48>

20. Решетков Д.М., Бондарюк М.А., Онищенко С.П. Сутність, переваги та існуючий досвід розвитку розумних портів. *Розвиток транспорту*. 2022. № 4 (15). С. 108-122. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.09>

21. Review of Maritime Transport 2023: Towards A Green And Just Transition. United Nations, Geneva. 2023. 126 p.

22. Review of Maritime Transport 2021. United Nations, Geneva. 2021. 147 p.

Reshetkov D.M., Koskina Yu.O. DECARBONIZATION OF SEA CARRIAGES – REQUIREMENTS AND PERSPECTIVES

The article is noted the reviewing and updating the situation of the current processes of implementing decarbonization measures in the maritime cargo transportation sector; which are a logical consequence of the global world goals to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere. Shipping in general and the merchant fleet in particular are involved in solving the problem of greening the maritime industry, which is implemented in the requirements and rules for the decarbonization of the maritime fleet. The article briefly outlines the IMO's goals for decarbonization of the maritime industry and identifies the main bottlenecks in their implementation. An analysis of greenhouse gas emissions based on ship type and flag country is presented. Achieving the targets declared by the IMO in accordance with the milestones is problematic for shipowners. The transition to alternative fuels as a way to reduce carbon emissions is rather slow, as it requires significant investments in modernization of the existing fleet and consideration of new requirements when ordering new ships. It is noted that the decarbonization of the fleet as such is not possible without appropriate organizational, technological and investment solutions and the necessary changes in the practice of bunkering ships. The situation is further complicated by an inconsistent legal framework due to the specifics of registration of fleet ownership in accordance with the flag under which the vessels are registered and

the country of residence of the vessel owner. The importance of a comprehensive sectoral solution to the problem of fleet decarbonization is emphasized. After all, shipping companies cannot achieve this goal on their own, as it involves rapid and significant investments, the development of a unified regulatory framework, the development and implementation of innovative technical and technological solutions, and the expansion and strengthening of horizontal and vertical cooperation between shipping entities. In this regard, the key role of ports in the implementation of measures to decarbonize maritime transportation was noted. The need for Ukraine to join initiatives in this area was emphasized, which should be taken into account in future projects for the development of domestic maritime transport.

Key words: decarbonization, greenhouse gas emissions, maritime transport, transportation, vessels, ports.

УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/46>**Семичаєвський С.В.**

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України

Присяжнюк В.В.

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України

Якіменко М.Л.

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України

Осадчук М.В.

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України

Свірський В.В.

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України

ПРО РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВО ОБГРУНТОВАНИХ НОРМ ОСНАЩЕННЯ ПЕРЕНОСНИМИ ВОГНЕГАСНИКАМИ КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У статті розглянуто основні положення нових норм оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів.

З'ясовано, що пожежі на колісних транспортних засобах виникають під час їх експлуатації, ремонту, внаслідок дорожньо-транспортних пригод і підпалів, на стоянках, під час проведення випробувань нових зразків і моделей транспортних засобів. Однією з основних складових підвищення рівня протипожежного захисту транспортних засобів є наявність науково обгрунтованих норм оснащення їх вогнегасниками. Такі норми повинні враховувати особливості транспортних засобів і сучасний технічний рівень вогнегасників.

З'ясовано, що чинні в Україні Норми оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння не враховують не лише нову класифікацію транспортних засобів, але й не відповідають сучасному стану автопарку України, який суттєво змінився за останні п'ятнадцять років. Крім того, в Нормам вказана мінімальна кількість, тип та позначення тільки порошкових вогнегасників, в той час як останнім часом в Україні і провідних країнах світу з'явилися нові типи вогнегасних речовин, а також колісних транспортних засобів, зокрема і з електричним двигуном.

Розглянуто таблицю із порівнянням чинних в Україні Норм оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння та проєкту нових Норм оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів (із двигунами внутрішнього згорання).

Розглянуто нові Норми оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів із іншими специфічними типами двигунів.

Визначено чинники, від яких залежить процес гасіння пожеж вогнегасниками на колісних транспортних засобах, наприклад, орієнтовний час від початку виявлення пожежі водієм колісного транспортного засобу до початку її гасіння вогнегасником, якість вогнегасної речовини, людський фактор, тощо.

З'ясовано, що у нових нормах оснащення колісних транспортних засобів переносними вогнегасниками встановлено нову класифікацію колісних транспортних засобів як із двигунами внутрішнього згорання, так і з іншими специфічними типами двигунів, передбачено оснащення колісних транспортних засобів на вибір або порошковими або водопінними вогнегасниками, збільшено заряди для порошкових вогнегасників.

Ключові слова: класифікація, колісні транспортні засоби, норми оснащення, переносні вогнегасники.

Постановка проблеми. Одним із важливих елементів безпеки колісних транспортних засобів є їх пожежна безпека. Пожежі на колісних транспортних засобах виникають під час їх експлуатації, ремонту, внаслідок дорожньо-транспортних пригод і підпалів, на стоянках, під час проведення випробувань нових зразків і моделей транспортних засобів [1, 2, 3].

Однією з основних складових підвищення рівня протипожежного захисту транспортних засобів є наявність науково обґрунтованих норм оснащення їх вогнегасниками. Такі норми повинні враховувати особливості транспортних засобів і сучасний технічний рівень вогнегасників [4].

Слід зазначити, що існуючі Норми оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння [5] певною мірою застаріли та не відповідають потребам сьогодення.

Тому для вирішення актуального питання щодо можливості застосування різних типів вогнегасників на сучасних колісних транспортних засобах є необхідність розроблення науково обґрунтованих норм оснащення їх переносними вогнегасниками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що на величину наслідків від пожеж (травмування та загибель людей, матеріальні збитки) впливає ефективність системи протипожежного захисту [4]. На основі аналізу діючої законодавчої бази України, яка ґрунтується на законах України «Про транспорт» [6], «Про автомобільний транспорт» [7], «Про дорожній рух» [8], та інших нормативно-правових актів, встановлено, що у вказаних нормативних документах не визначені вимоги до застосування систем забезпечення пожежної безпеки автотранспортних засобів і не конкретизовано вимоги до систем чи їх елементів [4].

Так, наприклад, статтею 10 Закону України «Про транспорт» [6] встановлено, що «транспортні засоби повинні відповідати вимогам безпеки, охорони праці та екології, державним стандартам, мати відповідний сертифікат». Згідно зі статтею 29 Закону України «Про дорожній рух» [8], «до участі у дорожньому русі допускаються транспортні засоби, конструкція і технічний стан яких відповідають вимогам діючих в Україні правил, нормативів і стандартів, що мають сертифікат на відповідність цим вимогам».

Відповідно до статті 20 Закону України «Про автомобільний транспорт» [7], «конструкція та технічний стан транспортних засобів, а також їх частини мають відповідати вимогам, порядок визначення яких встановлює Кабінет Міністрів

України, та забезпечувати безпеку людей, які користуються транспортними засобами чи беруть участь у дорожньому русі». Окрім того, вимоги щодо оснащення транспортних засобів протипожежними системами відсутні і в Кодексі цивільного захисту України [9].

Інші нормативно-правові акти вказують на необхідність в якості оснащення транспортних засобів системами протипожежного захисту забезпечувати їх первинними засобами пожежогасіння, тобто вогнегасниками. Так, згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 1306 від 10 жовтня 2001 року «Про правила дорожнього руху» [10], «забороняється експлуатація транспортного засобу за відсутності працездатного вогнегасника».

Національний стандарт України ДСТУ 3649-2010 [11] містить вимогу стосовно того, що транспортні засоби повинні бути укомплектовані вогнегасниками, а в автобусі та в вантажному автомобілі, тимчасово обладнаному для перевезення пасажирів, один вогнегасник повинен знаходитися у кабіні водія, а інший – у пасажирському салоні (кузові).

Чинні в Україні Норми оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння [5] не враховують не лише класифікацію транспортних засобів згідно з постановою КМУ від 22 грудня 2010 р. № 1166 [12], але й не відповідають сучасному стану автопарку України, який суттєво змінився за останні п'ятнадцять років. Зміни стосуються збільшення кількості електромобілів та гібридних транспортних засобів, які мають інший характер розвитку пожежі. Зрештою, ця проблематика була піднята та детально описана у праці [13]. Крім того, в Нормам [5] вказана мінімальна кількість, тип та позначення тільки порошкових вогнегасників, в той час як останнім часом в Україні і провідних країнах світу з'явилися нові типи вогнегасних речовин, а також колісних транспортних засобів, зокрема і з електричним двигуном.

Постановка завдання. Для сприяння у вирішенні зазначеної вище проблеми, з метою удосконалення нормативної бази щодо оснащення первинними засобами пожежогасіння колісних транспортних засобів, в Інституті наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України за замовленням ДСНС України проведено науково-дослідну роботу за темою: «Обґрунтування параметрів та типів первинних засобів пожежогасіння для оснащення колісних транспортних засобів» («Колісні транспортні засоби – норми оснащення»).

Для досягнення поставленої мети в цій публікації необхідно проаналізувати нові норми оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів, які було розроблено в результаті виконання вказаної науково-дослідної роботи на підставі проведених аналітичних та експериментальних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Аналіз нових норм оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів

Під час розроблення науково-обґрунтованих норм оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів враховано сучасну класифікацію колісних транспортних засобів із двигунами внутрішнього згорання відповідно до постанови КМУ від 22 грудня 2010 р. № 1166 [12] та ДСТУ 3649:2010 [11].

Крім того, в розроблених нормах нами враховано автомобілі із іншими специфічними типами двигунів та запропоновано їх оснащувати вогнегасниками, які відповідають колісним транспортним засобам із двигунами внутрішнього згорання, але тільки для забезпечення пожежної безпеки салону таких автомобілів. Класифікація колісних транспортних засобів із іншими специфічними типами двигунів прийнята згідно з Законом України від 24.02.2023 року № 2956-IX [14].

Згідно з чинною постановою КМУ від 22 грудня 2010 р. № 1166 [12] передбачено, що легковий автомобіль загального, спеціалізованого та спеціального призначення має бути оснащений одним порошковим вогнегасником (закачного типу ВП-2 (з)) або газом-витискувачем у балоні ВП-2) із зарядом вогнегасної речовини не менше 2 кг.

Враховуючи сучасну класифікацію колісних транспортних засобів згідно з ДСТУ 3649:2010 [11], постановою КМУ від 22 грудня 2010 р. № 1166 [12] та результати встановлення взаємозв'язку між рангом вогнегасників та параметрами пожежної навантаги колісних транспортних засобів і результати експериментальних досліджень, нами запропоновано, що колісні транспортні засоби, призначені для перевезення пасажирів і які мають не більше ніж 8 місць, не враховуючи місце водія, мають бути оснащені на вибір одним порошковим вогнегасником з масою заряду вогнегасної речовини не менше ніж 3 кг або одним водопінним вогнегасником з масою заряду вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг.

Стосовно забезпечення вогнегасниками автобусів у чинній постанові КМУ від 22 грудня 2010 р. № 1166 [12] передбачено, що автобус (пасажирський автомобіль), що має більше ніж 9 місць для

сидіння з місцем водія включно, з повною масою не більше 5 тонн) має бути оснащений одним порошковим вогнегасником (закачного типу ВП-3(з)) або з газом-витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг.

Автобус (пасажирський автомобіль), що має більше ніж 9 місць для сидіння з місцем водія включно, з повною масою понад 5 тонн) має бути оснащений одним порошковим вогнегасником (закачного типу ВП-5(з)) або з газом-витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг.

Нами запропоновано, що колісні транспортні засоби, які призначені для перевезення пасажирів і мають більше ніж 8 місць, не враховуючи місце водія, і максимальну масу не більше ніж 5 тонн, мають бути забезпечені на вибір одним порошковим вогнегасником з масою заряду вогнегасної речовини не менше ніж 5 кг або двома водопінними вогнегасниками з масою заряду вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний.

Колісні транспортні засоби, які призначені для перевезення пасажирів і мають більше ніж 8 місць, не враховуючи місце водія, і максимальну масу, що перевищує 5 тонн, мають бути забезпечені на вибір двома порошковими вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний або двома водопінними вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний та одним водопінним вогнегасником з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний.

Щодо забезпечення вогнегасниками вантажних автомобілів у чинній постанові КМУ від 22 грудня 2010 р. № 1166 [12] передбачено, що вантажний автомобіль загального, спеціалізованого та спеціального призначення з повною масою:

- не більше 3,5 тонн має оснащуватись одним порошковим вогнегасником (закачного типу ВП-3 (з)) або з газом – витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг;

- від 3,5 тонн, але не більше 12 тонн має оснащуватись одним порошковим вогнегасником (закачного типу ВП-5(з)) або з газом – витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг;

- понад 12 тонн має оснащуватись одним порошковим вогнегасником (закачного типу ВП-9(з)) або з газом – витискувачем у балоні ВП-9) із зарядом вогнегасної речовини не менше 9 кг.

Нами запропоновано, що:

- колісні транспортні засоби, які призначені для перевезення вантажів, максимальна маса яких

не перевищує 3,5 тонни, мають оснащуватися на вибір одним порошковим вогнегасником з масою вогнегасної речовини не менше ніж 5 кг або двома водопінними вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний;

- колісні транспортні засоби, які призначені для перевезення вантажів, максимальна маса яких перевищує 3,5 тонни, але не перевищує 12 тонн, мають оснащуватися на вибір одним порошковим вогнегасником з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг або двома водопінними вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний;

- колісні транспортні засоби, призначені для перевезення вантажів, максимальна маса яких перевищує 12 тонн, мають оснащуватися на вибір двома порошковими вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний або двома водопінними вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний та двома водопінними вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний.

З приводу забезпечення вогнегасниками причепів та напівпричепів у чинній постанові КМУ від 22 грудня 2010 р. № 1166 [12] передбачено, що причеп, напівпричеп з повною масою:

- від 0,75 тонн, але не більше 3,5 тонн, має оснащуватись одним порошковим вогнегасником (закачного типу ВП-3(з) або з газом – витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг;

- від 3,5 тонн, але не більше 10 тонн, має оснащуватись одним порошковим вогнегасником (закачного типу ВП-5(з) або з газом витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг;

- понад 10 тонн, має оснащуватись одним порошковим вогнегасником (закачного типу ВП-9(з) або з газом – витискувачем у балоні ВП-9) із зарядом вогнегасної речовини не менше 9 кг.

Стосовно причепів та напівпричепів нами запропоновано, що:

- причепа, що мають максимальну масу не більше ніж 0,75 тонн, мають оснащуватись на вибір одним порошковим вогнегасником з масою вогнегасної речовини не менше ніж 2 кг або одним водопінним вогнегасником з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг;

- причепа з максимальною масою, що перевищує 0,75 тонн, але не перевищує 3,5 тонни, мають оснащуватись на вибір одним порошковим вогнегасником з масою вогнегасної речовини не менше ніж 5 кг або двома водопінними вогнегасниками

з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний;

- причепа з максимальною масою, що перевищує 3,5 тонни, але не перевищує 10 тонн, мають оснащуватись на вибір двома порошковими вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 5 кг кожний або двома водопінними вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний та одним водопінним вогнегасником з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг;

- причепа з максимальною масою, що перевищує 10 тонн, мають оснащуватись на вибір двома порошковими вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний або двома водопінними вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний та двома водопінними вогнегасниками з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний.

В таблиці 1 наведено порівняння чинних в Україні Норм [5] та проекту нових Норм щодо оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів (із двигунами внутрішнього згорання).

В таблиці 2 наведено норми оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів із іншими специфічними типами двигунів

Таким чином, проєкт нових норм оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів передбачає:

- сучасну класифікацію колісних транспортних засобів із двигунами внутрішнього згорання згідно з Постановою КМУ від 22 грудня 2010 р. № 1166 [11] та ДСТУ 3649:2010 [12] та із іншими специфічними типами двигунів згідно з Законом України від 24.02.2023 року № 2956-IX [14];

- оснащення колісних транспортних засобів на вибір або порошковими або водопінними вогнегасниками;

- збільшені заряди для порошкових вогнегасників.

Додатково норми містять низку приміток, які спрямовані на застосування вогнегасників, кліматичні фактори, вид вогнегасної речовини, час ефективного застосування та низку застережень щодо безпечного використання вогнегасників, а саме.

Під час проведення розрахунку необхідної кількості вогнегасників та обґрунтування збільшення заряду вогнегасної речовини враховувалися такі чинники, від яких залежить процес гасіння пожеж вогнегасниками на колісних транспортних засобах, а саме:

Таблиця 1

Порівняння чинних в Україні Норм [5] та проєкту нових Норм оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів (із двигунами внутрішнього згорання)

Загальна назва колісного транспортного засобу	Мінімальна кількість, тип переносних вогнегасників та маса заряду вогнегасної речовини	
	<i>Чинна постанова КМУ</i>	<i>Проект нової постанови КМУ</i>
Легкові автомобілі	один порошковий (закачного типу ВП-2 (з)) або газом-витискувачем у балоні ВП-2) із зарядом вогнегасної речовини не менше 2 кг	один порошковий з масою заряду вогнегасної речовини не менше ніж 3 кг або один водопінний з масою заряду вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг
Вантажні автомобілі з повною масою:		
не більше 3,5 т	один порошковий (закачного типу ВП-3 (з) або з газом – витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг	один порошковий з масою вогнегасної речовини не менше ніж 5 кг або два водопінних з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний
від 3,5 т, але не більше 12 т	один порошковий (закачного типу ВП-5(з) або з газом – витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг	один порошковий з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг або два водопінні з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний
понад 12 т	один порошковий (закачного типу ВП-9(з) або з газом – витискувачем у балоні ВП-9) із зарядом вогнегасної речовини не менше 9 кг	два порошкових з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний або два водопінних з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний та два водопінні з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний
Причіпи, напівпричіпи з повною масою:		
менше 0,75 т	не передбачено	один порошковий з масою вогнегасної речовини не менше ніж 2 кг або один водопінний з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг
від 0,75 т, але не більше 3,5 т	один порошковий (закачного типу ВП-3(з) або з газом – витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг	один порошковий з масою вогнегасної речовини не менше ніж 5 кг або два водопінних з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний
від 3,5 т, але не більше 10 т	один порошковий (закачного типу ВП-5(з) або з газом витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг	два порошкових з масою вогнегасної речовини не менше ніж 5 кг кожний або два водопінні з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний та один водопінний з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг
понад 10 т	один порошковий (закачного типу ВП-9(з) або з газом – витискувачем у балоні ВП-9) із зарядом вогнегасної речовини не менше 9 кг	два порошкових з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний або два водопінні з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний та два водопінні з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний
Автобуси (пасажирські автомобілі), що мають більше ніж 9 місць для сидіння з місцем водія включно, з повною масою:		
не більше 5 т	один порошковий (закачного типу ВП-3(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг	один порошковий з масою заряду вогнегасної речовини не менше ніж 5 кг або два водопінні з масою заряду вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний
понад 5 т	один порошковий (закачного типу ВП-5(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг	два порошкові з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний або два водопінні з масою вогнегасної речовини не менше ніж 9 кг кожний та один водопінний з масою вогнегасної речовини не менше ніж 6 кг кожний

**Норми оснащення переносними вогнегасниками колісних транспортних засобів
із іншими специфічними типами двигунів**

№ п/п	Характеристика КТЗ згідно з Законом України від 24.02.2023 року № 2956-IX [14]	Мінімальна кількість переносних вогнегасників та заряд вогнегасної речовини
1	Автомобіль з водневим паливним елементом (коміркою) – автомобіль (автобус, автомобіль вантажний), оснащений виключно електричними тяговими двигунами (одним чи декількома), які працюють за рахунок енергії, отриманої з водню	Оснащуються вогнегасниками за аналогією з нормами оснащення колісних транспортних засобів із двигунами внутрішнього згорання в залежності від кількості місць та максимальної маси (тонн)
2	Автомобіль плагін-гібридний – колісний транспортний засіб, оснащений електричним тяговим двигуном та двигуном внутрішнього згорання. Система акумулювання електричної енергії (акумуляторна батарея) автомобіля плагін – гібридного має технічні можливості заряджатися від зовнішнього джерела електричної енергії	
3	Електробус – автобус, оснащений виключно електричними тяговими двигунами (одним чи декількома) та системою акумулювання електричної енергії (акумуляторною батареєю)	
4	Електробус з подовженим запасом ходу – різновид електробуса з двигуном внутрішнього згорання, який не з'єднаний з трансмісією, тобто не бере участі в пересуванні транспортного засобу та призначений лише для обертання електрогенератора, оснащений та приводиться в рух виключно електричними тяговими двигунами (одним чи декількома), системою акумулювання електричної енергії (акумуляторною батареєю), яка здатна заряджатися шляхом підключення до зовнішнього джерела електричної енергії	Оснащуються вогнегасниками за аналогією з нормами оснащення колісних транспортних засобів із двигунами внутрішнього згорання в залежності від кількості місць та максимальної маси (тонн)
5	Електромобіль вантажний – автомобіль вантажний, оснащений виключно електричними тяговими двигунами (одним чи декількома) та системою акумулювання електричної енергії (акумуляторною батареєю)	
6	Електромобіль легковий – автомобіль легковий, оснащений виключно електричними тяговими двигунами (одним чи декількома) та системою акумулювання електричної енергії (акумуляторною батареєю)	

– орієнтовний час від початку виявлення пожежі водієм колісного транспортного засобу до початку її гасіння вогнегасником складає 60 с (цей час необхідний щоб зупинити автомобіль, дістати вогнегасник та почати гасіння пожежі);

- якість вогнегасної речовини;
- місця зберігання вогнегасників в автомобілі (в багажнику, салоні);
- механічний стан колісного транспортного засобу;
- людський фактор, тобто досвід оператора з гасіння (має значення правильна тактика подавання вогнегасної речовини до осередку пожежі);
- конструктивні особливості самого вогнегасника;
- погодні умови тощо.

Висновки.

1. У нових нормах оснащення колісних транспортних засобів переносними вогнегасниками встановлено:

– нову класифікацію колісних транспортних засобів як із двигунами внутрішнього згорання згідно з ДСТУ 3649:2010 [11] та постановою КМУ від 22 грудня 2010 № 1166 [12], так і з іншими специфічними типами двигунів згідно з Законом України від 24.02.2023 року № 2956-IX [14];

– оснащення колісних транспортних засобів на вибір або порошковими або водопінними вогнегасниками;

– збільшені заряди для порошкових вогнегасників.

2. Після впровадження проєкту норм оснащення вони будуть застосовуватись пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС України, виробниками продукції, перевізниками та власниками колісних транспортних засобів для запобігання загибелі та травмування водіїв та пасажирів, що перевозяться колісними транспортними засобами, а також мінімізації матеріальних збитків від можливих загорянь.

Список літератури:

1. Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В., Осадчук М.В., Якіменко М.Л. Щодо необхідності обґрунтування параметрів та типів первинних засобів пожежогасіння для оснащення колісних транспортних засобів. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2023. Том 34 (73) № 1. С. 288-294.
2. Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В., Якіменко М.Л., Осадчук М.В. Визначення параметрів горіння модельних вогнищ пожежі класу А для подальшого їх застосування під час моделювання пожежі колісних транспортних засобів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 1 (17). С. 4-14.
3. Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В., Якіменко М.Л., Осадчук М.В., Свірський В.В. Щодо обґрунтування параметрів і типів переносних вогнегасників для оснащення колісних транспортних засобів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (18). С. 45-54.
4. Гаврилюк А.Ф. Пожежна небезпека колісних транспортних засобів: монографія. Львів, 2018. 182 с.
5. Про забезпечення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння: Постанова КМУ від 08 жовтня 1997р. № 1128, із змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ від 04 червня 2003 р. № 873 (873-2003-п) та від 03 вересня 2009 р. № 934 (934-2009-п)/ Верховна Рада України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1128-97-п> (дата звернення: 14.09.2009).
6. Про транспорт: Закон України від 10 листопада 1994 р. № 233/94-ВР / Верховна Рада України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр> (дата звернення: 28.05.2024).
7. Про автомобільний транспорт: Закон України від 23 лютого 2006 р. № 3492-IV / Верховна Рада України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14> (дата звернення: 15.11.2024)..
8. Про дорожній рух: Закон України від 28 січня 1993 р. № 2953-XII / : за станом на 28.06.2023 р. / Верховна Рада України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3353-12> (дата звернення: 05.01.2025).
9. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI. Голос України. 2012. № 220.
10. Про правила дорожнього руху: Постанова КМУ від 10 жовтня 2001р. № 1306 / Верховна Рада України. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-п> (дата звернення: 14.01.2025).
11. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. Київ, 2011. 28 с.
12. Про єдині вимоги до конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів, що експлуатуються: Постанова КМУ від 22 грудня 2010 р. № 1166, із змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ від 22 березня 2017 р. № 161 (161-2017-п) та від 05 січня 2021 р. № 7 (7-2021-п) / Верховна Рада України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1166-2010-п> (дата звернення: 14.01.2021).
13. Гаврилюк А.Ф., Лин А.С. Протипожежний захист колісних транспортних засобів та шляхи його підвищення. *Пожежна безпека*. 2017. № 31. С. 11-16.
14. Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів: Закон України від 24 лютого 2023 р. № 2956-IX / Верховна Рада України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2956-20> (дата звернення: 27.07.2023).

Semychayevsky S.V., Prisyajnyuk V.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V., Svirskyi V.V. ABOUT THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC PRIMING STANDARDS EQUIPPED WITH PORTABLE FLAME EXHAUSTERS OF WHEEL TRANSPORT VEHICLES

The article examines the main provisions of the new standards for equipping wheeled vehicles with portable fire extinguishers.

It has been established that wheeled vehicles suffer from damage during their operation, repairs, as a result of road use and scorching, in parking lots, during testing of new designs and models of transport vehicles. One of the main warehouse advances in the counter-protection of transport means is the presence of scientifically based standards for equipping them with extinguishing agents. Such standards are responsible for the peculiarities of transport methods and the current technical level of flammable agents.

It is clear that in Ukraine the standards for equipping wheeled vehicles with primary fire-fighting equipment are not covered by the new classification of vehicles, but do not correspond to the current state of the Ukrainian vehicle fleet, which having changed completely over the remaining fifteen years. In addition, the Standards specify the minimum calorific value of only powdered flammable extinguishing agents, while new types of flammable extinguishing agents have recently appeared in Ukraine and other parts of the world, as well as wheeled vehicles powered by an electric motor.

The table of updated Standards for equipping wheeled vehicles with primary fire extinguishers and the draft new Standards for equipping wheeled vehicles with portable fire extinguishers (including internal combustion engines) are reviewed.

New standards for equipping wheeled vehicles with other specific types of engines with portable fire extinguishers are reviewed.

Officials have been identified to carry out the process of extinguishing fires caused by fire extinguishing agents on wheeled transport vehicles, for example, the approximate time from the beginning of the fire to extinguishing fire extinguishing agents on wheeled transport vehicles. flaming speech, human factor, etc.

It is clear that the new standards for equipping wheeled vehicles with portable fire extinguishers establish a new classification of wheeled vehicles both with internal combustion engines and with other specific types of engines, The equipment of wheeled transport vehicles has been transferred to select either powder or water-based ignitants; the charge for powder ignitants has been increased.

Key words: *classification, equipment standards, portable fire extinguishers, wheeled transport vehicles.*

Сільванська Г.М.

Одеський національний морський університет

СУЧАСНА КЛАСИФІКАЦІЯ ТА СТРУКТУРА ЗАСОБІВ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У статті розглянуто питання щодо ключових факторів розвитку світового ринку пасажирського та круїзного судноплавства. Представлена класифікація та структура засобів пасажирських перевезень. Надано інформацію про сучасний стан засобів пасажирського та круїзного судноплавства. Визначено зміни у його структурі за регіональними пасажирськими потоками.

Охарактеризовано стратегічні напрями діяльності провідних круїзних компаній, визначено їх ринкові пріоритети. Проаналізовано дані щодо планів на оновлення круїзного флоту до 2027 року. Аналізується стрімкий розвиток круїзного туризму в світі в останні десятиліття. Впродовж останніх десятиліть ринок морських круїзів демонстрував значне збільшення і стабільний приріст. На світовому круїзному ринку спостерігається дуже висока концентрація флоту в руках небагатьох круїзних компаній, які контролюють майже 85% ринку круїзних послуг. Круїзні подорожі досягли у 2023 році – 31,7 мільярдів. Пасажирів, у 2027 році прогнозується, що кількість круїзних пасажирів зросте до майже 40 мільярдів. Розвиток круїзного туризму має синергетичний ефект для розвитку місцевої економіки: збільшення надходжень до бюджетів всіх рівнів; створення нових робочих місць у сферах обслуговування, рекламування туристичних можливостей регіону (країни в цілому); інфраструктури яка дає можливість для міжнародного співробітництва; залучення інвестицій у розвиток транспортної та портової інфраструктури тощо. Усе вище означене вимагає пошуку ефективного механізму управління функціонуванням пасажирським флотом (круїзних послуг та лінійних послуг) Нові туристичні стратегії, максимізують соціально-економічні вигоди. Метою дослідження є аналіз сучасного стану світового ринку засобів пасажирських перевезень та обґрунтування методики оцінки факторів, що впливають на конкурентоспроможність круїзних компаній.

Ключові слова: Засоби пасажирських перевезень, класифікація, База даних, фактори впливу.

Постановка проблеми. Проаналізовано стану та еволюція засобів ринку пасажирських перевезень. Кількість нових круїзних суден зростає та становить 27% за останні два роки. Дослідження ринку пасажирських засобів перевезень є актуальним з огляду на постійні зміни в технологічному, економічному та екологічному середовищі. Воно дозволяє виявити нові тенденції розвитку, оцінити перспективи впровадження інновацій та підвищити ефективність використання пасажирських перевезень у сучасному глобальному транспортному ландшафті.

Для рішення цієї проблеми потрібно провести класифікацію засобів пасажирських перевезень. Дослідження виявило, що основою нових пасажирських засобів, повинні бути лайнери. нового покоління, здатні на самостійну переробку твердих відходів, генерування і акумулювання електроенергії, тобто відтворення повного виробничого циклу. Технічні можливості зазначених суден повинні інтегруватися з потребами подорожуючих та пріоритетами щодо збереження туристичних ресурсів,

одночасно підтримуючи оптимальний рівень безпеки. Розв'язується одна з ключових проблем і в результаті збільшується життєвий цикл судна та його продукту. Виявити фактори впливу на економічну ефективність маршрутів для конкретних круїзних лайнерів. Адаптація лайнерів до потреб споживача. Опреділення класу судна.

Аналізується та прогнозується стан ринку засобів ринку пасажирського судноплавства. Аналіз розподілу ринку поміж існуючими компаніями на Базі Баних спроектованої автором.

Відповідно з цією метою були поставлені та вирішені такі завдання:

- класифікувати сучасні засоби пасажирських перевезень;
- провести аналіз сучасного стану існуючих пасажирських засобів перевезення ринку;
- виявити основні оперуючі круїзні компанії;
- визначити чинники, що впливають на конкурентоспроможність компанії, оцінити рівень впливу цих чинників на величину прибутку компанії.

Результати:

- проаналізовано сучасного стану існуючих засобів ринку пасажирських перевезень;
- проведено аналіз сучасного стану існуючих та майбутніх засобів ринку пасажирських перевезень, виявлена доля кожної компанії на ринку перевезень;
- представлена класифікація засобів пасажирських перевезень за їх функціоналом;
- виявлено фактори впливу на величину пасажиропотоку.

Проведено аналіз та класифікацію сучасного стану засобів пасажирського ринку [1, 2, 5].

Розглянуто круїзний ринок за різними показниками (рис. 1). Використовуючи Базу Даних круїзних суден, розроблену автором, були проаналізувати техніко-економічні показники суден та їх частки ринку компаній (груп), з підтвердженням 2023 року олігополії цієї галузі. Було розглянуто фінансово-економічні та статистичні дані за 2022 рік за основними 4 групами, а також за напрямками діяльності. Представити прогнози щодо кількості круїзних пасажирів, які будуть перевезені в найближчі роки (2023–2028) і щодо фінансових показників «великої трійки» (2023–2030) (рис. 1). Представлено флот круїзних компаній-членів CLIA. Засобами математичного апарату, багато- факторного аналізу, методом виділення: головних компонентів, було виявити фак-

тори впливу на величину прибутку, який прямо пропорційна пасажирському потоку.

Постановка завдання. Аналізується та прогнозується техніко-економічний стан засобів ринку пасажирського судноплавства. Відповідно до мети були поставлені слідує завдання:

– Спроекувати єдину Базу даних для управління діяльністю судноплавної компанії. База даних, яка містить 445 океанських круїзних лайнерів (включаючи ті, які будуть випущені в 2023 році) місткістю >39 пасажирів Надати структуру Базу Даних яка показує характеристики: 1. Назва судна. 2. Клас. 3. Трифставка. 4. Пассажирамисткість. 5. Комфортабельність. 6. Сезонність. 7. Тонаж (рис. 2).

– Виявити основні тенденції розвитку та техніко-економічного стану засобів перевезення світових круїзних компаній. Провести аналіз даних на базі статистики. Використовувалася програма SPSS(Statistics Powerful Statistical Software platform), версії 19 [3, 4, 5].

– Надати класифікацію засобів пасажирських перевезень в залежності від форми організації перевезення засобів перевезення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проводився аналіз сучасного стану світового круїзного ринку [1, 2]. Виявлені основні тенденції розвитку світових круїзних компаній. Загалом висновки зводяться до необхідності розвитку круїзного суд-

CLIA-member Cruise Line Ships Launching in 2024

CLIA CRUISE LINES INTERNATIONAL ASSOCIATION



Рис. 1. Стан круїзних суден 2024 р.

	Найменування	Клас	Тариф	Пасажирос	Комфор	Сезонність	Тоннаж	Region	VAR00001	пер	пер	пер	пер	пер
1	Harmony of the Seas	Main	50	6600,00	5	f	226802	4						
2	AIDA Cruises	Premi	100	2200,00	5	f	183920	4						
3	MSC Grandiosa	Main	100	56000,00	3	f	214000	4						
4	MS Costedam	Luxury	150	1900,00	4	f	82300	3						
5	MS Eurodam	Ultra	150	2100,00	4	f	86200	3						
6	Symphony of the Seas	Main	150	6500,00	5	f	228021	4						
7	Oasis of the Seas	Main	150	6650,00	4	f	228000	4						
8	Costa Smeralda	Main	200	6600,00	4	f	183900	4						
9	Allure	Main	200	6600,00	5	f	225282	4						
10	Eurodam	Ultra	250	2100,00	4	f	92000	2						
11	Coral Princess	Ultra	250	2400,00	4	f	91060	2						
12	Island Princess	Ultra	250	2500,00	4	f	920002	2						
13	MS Rotterdam	Ultra	250	2650,00	4	f	99800	2						
14	MSC Bellissima	Main	250	5700,00	4	f	225000	3						
15	Holland America	Luxury	350	1700,00	3	4	489000	1						
16	Celebrity	Luxury	350	1700,00	3	4	482000	1						
17	Norwegian Sky s	Luxury	350	2100,00	3	4	40000	2						
18	Sea Princess	Luxury	350	2200,00	4	4	77400	2						
19	MS Rossia	Luxury	400	350,00	4	4	41000	3						
20	MS Douro Splendour	Luxury	400	350,00	4	4	41000	1						
21	River Princess s	Luxury	400	125,00	4	4	31000	3						

Рис. 2. База даних пасажирських суден [3, 4]

ноплавства, модернізації інфраструктури морських портів [3]. В той же час дослідження потенціалу регіональних ринків круїзних послуг є недостатніми та потребують подальшої розробки автоматизації механізмів його експлуатації впровадження [5]. Якщо раніше така інформація циркулювала переважно у сфері інформаційно-комунікаційних технологій, то зараз практично вся інформація існує в електронній (цифровій) формі. Основа цифрової економіки це гіперзв'язаність суб'єктів як наслідок розвитку цифрових технологій. Таким чином, основою конкурентоспроможності компанії, двигуном її розвитку є цифрова трансформація її діяльності. Що забезпечує сталий розвиток бізнесу в умовах динаміки зовнішнього середовища. Постає необхідність впровадження методики проектування єдиної Бази даних системи управління діяльністю судноплавної компанії [6].

Виклад основного матеріалу. Спроектовано єдину Базу даних для управління діяльністю судноплавної компанії. Проведено аналіз сучасного стану світового круїзного ринку [1, 2, 5]. Виявлені основні тенденції розвитку та стану світових круїзних компаній. Проведений статистичний аналіз. Використовувалася програма SPSS (Statistics Powerful Statistical Software platform), версії 19 [3, 4, 5] (рис. 1). Виявити основні тенденції розвитку та техніко-економічного стану засобів перевезення світових круїзних компаній. Провести аналіз даних на базі статистики. Бази даних для аналізу виявила:

- Кількість нових круїзних суден зросла на 27%, що на 12% більше, ніж за минулий рік (рис. 3) [6, 7].

- Графік пасажиромісткості у провідних компаніях (рис. 4). Круїзи є найкращим вибором для подорожей кількох поколінь: понад 30% сімей подорожують у круїзі принаймні двома поколіннями, а 28% круїзних мандрівників подорожують трьома-п'ятьма поколіннями.

- Експедиції та дослідження є секторами круїзного туризму, які найшвидше розвиваються. Експедиційними маршрутами становить 71% від загальної кількості круїзів за період від 2019 по 2023 р.

- Екскурсії для людей з обмеженими можливостями зростають: 45% круїзних пасажирів бронюють доступний тур для круїзу.

Проведено аналіз розподілу ринку у 2023 р. поміж регіонами на базі даних CLIA (рис. 2).

Скорочення основних круїзних груп:

- CCL = Carnival Corporation&Plc
- RCG = Royal Caribbean CruisesLtd.
- NCLH = Norwegian CruiseLineHoldingsLtd.
- MSC = MSC CruisesGroup.

Представлені звіти з бази Даних:

Графік пасажиро місткості у провідних компаніях наведено на (рис. 4).

Наведено зростання круїзного флоту на 3,4% у 2024 р. на (рис. 5).

Флот круїзних компаній-членів CLIA досяг рекордні 300 кораблів у 2024 р. [6].

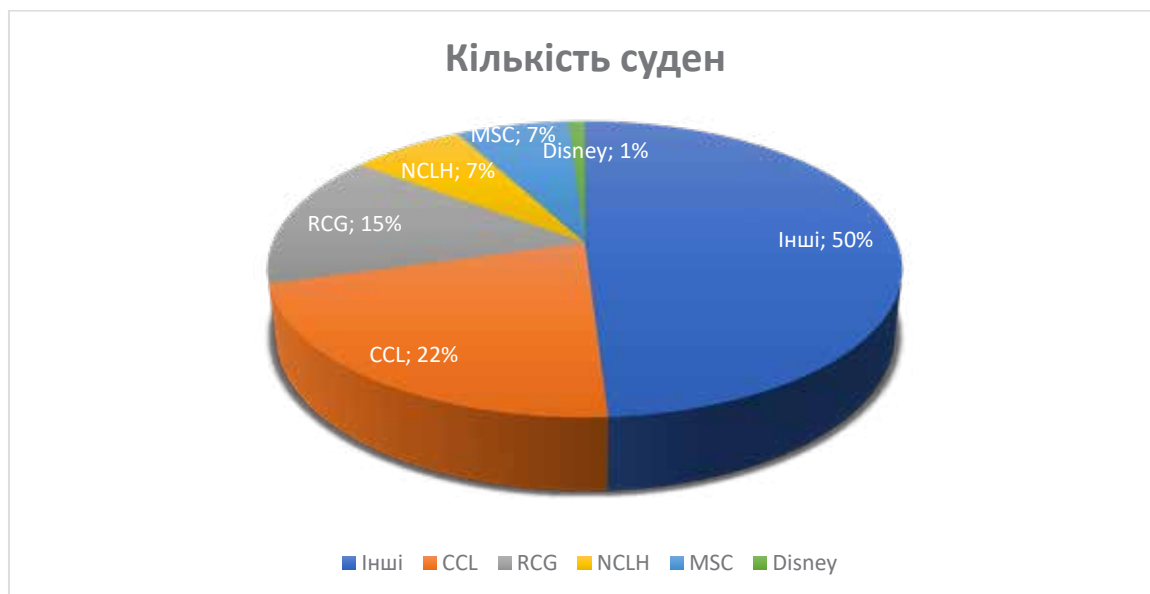


Рис. 3. Графік кількості суден у провідних компаніях



Рис. 4. Графік пасажиро місткості у провідних компаніях

Наведено структура пасажирського флоту виходячи з пасажиро місткості та розташування нижніх міст у каютах (на основі пасажиромісткості; відсотки, вказані в дужках, базуються на сьогоdnішньому парку) [9]. Поточний і майбутній флот включає баланс розмірів кораблів. Відсоток круїзних суден-членів CLIA за розміром судна 2023–2028 рр. (рис. 6).

Судна: роки оперування та місткість представлено у табл. 1–2.

Рекордним роком став 2008 рік із співвідношенням 2830 осіб на судно (рис. 7).

Зроблено графік залежності пасажиромісткості від довжини та ширини судна (рис. 8).

Виконано: представлені та проаналізовані результати операційної діяльності – 4 головних груп, їх операційна діяльність та їх прибуток основних круїзних груп у (млн. \$) проаналізовано та виведено у графік (рис. 3–9).

Доходи 4 основних груп: Квитки/Загальний дохід-наведено (рис. 10).

Доходи від послуг на борту продовжуватимуть зростати в порівнянні з доходами від продажу квитків у найближчому майбутньому. Є можли-

THE ORDERBOOK AND CLIA-MEMBER CRUISE LINE FLEET

The CLIA-member cruise line fleet: Surpassing 300 ships in 2024

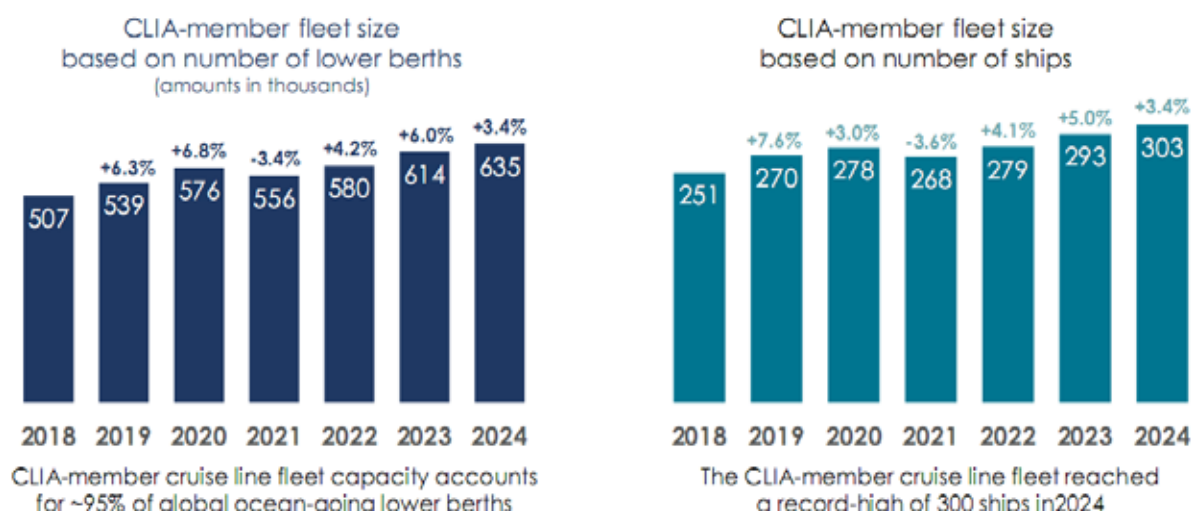


Рис. 5. Флот круїзних компаній-членів CLIA

The current and future fleet includes a balance of ship sizes.

Percentage of CLIA-member cruise line ships by ship size (2023 through 2028)

(based on passenger capacity; percentages shown in brackets are based on today's fleet)

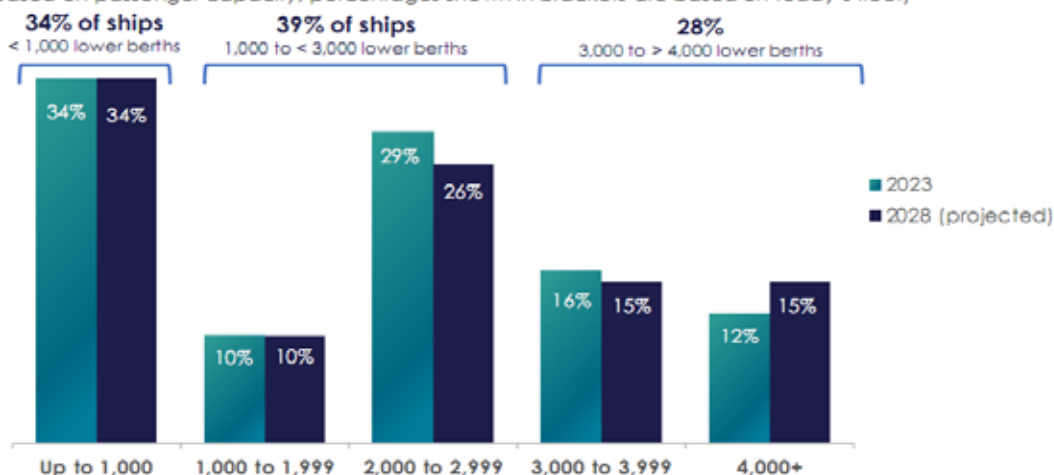


Рис. 6. Прогноз зростання круїзних лайнерів – відсоток круїзних суден-членів CLIA за розміром судна (2023–2028 рр.)

вість для впровадження агресивних політик щодо продажу квитків. Оперуючи даними Базы SPSS-зроблено прогноз по кількості лайнерів та пасажиромісткості. Майбутнє галузі (1): частка ринку на кінець 2028 року (табл. 3).

Майбутнє галузі: Прогноз доходів (рис. 11).

Виходячи з послідовності задач: Надана класифікацію засобів пасажирських перевезень в залежності від форми організації перевезення (рис. 3).

Океанські судна

Океанські пасажирські судна призначені для тривалих міжконтинентальних подорожей через океани. Вони здатні здійснювати перевезення на великих відстанях і в умовах відкритого моря. Океанські судна часто мають великі розміри і високу вантажопідйомність. Такі судна часто використовуються для круїзних подорожей, де комфорт пасажирів є одним із основних пріоритетів. Вони оснащені всім необхідним

Таблиця 1

Пасажиромісткість

Пасажиромісткість (подвійні ліжка)								
Роки	<500	501-999	1000-1999	2000-2999	3000-3999	4000-4999	>5000	Всього суден
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<1990	45	6	4	0	0	0	0	55
1990-1994	21	7	7	2	0	0	0	37
1995-1999	13	10	16	13	1	0	0	53
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2000-2004	12	10	17	29	5	0	0	73
2005-2009	6	1	2	17	13	0	1	40
2010-2014	9	2	2	13	12	3	1	42
2015-2019	21	13	0	8	10	12	5	69
2020-2024	34	11	1	7	6	6	11	76
Всього	161	60	49	89	47	21	18	445

Таблица 2

Пасажиromісткість (подвійні ліжка)

Роки	Пасажиромісткість (подвійні ліжка)	Усього суден	Співвідношення чол/судно
<1990	14,491	55	263
1990-1994	23,483	37	635
1995-1999	69,871	53	1,318
2000-2004	125,714	73	1,722
2005-2009	98,078	40	2,452
2010-2014	98,722	42	2,351
Пасажиромісткість (подвійні ліжка)	Усього суден	Співвідношення чол/судно	Пасажиромісткість (подвійні ліжка)
2015-2019	147,679	69	2,140
2020-2024	141,941	76	1,868
Всього	719,979	445	1.618

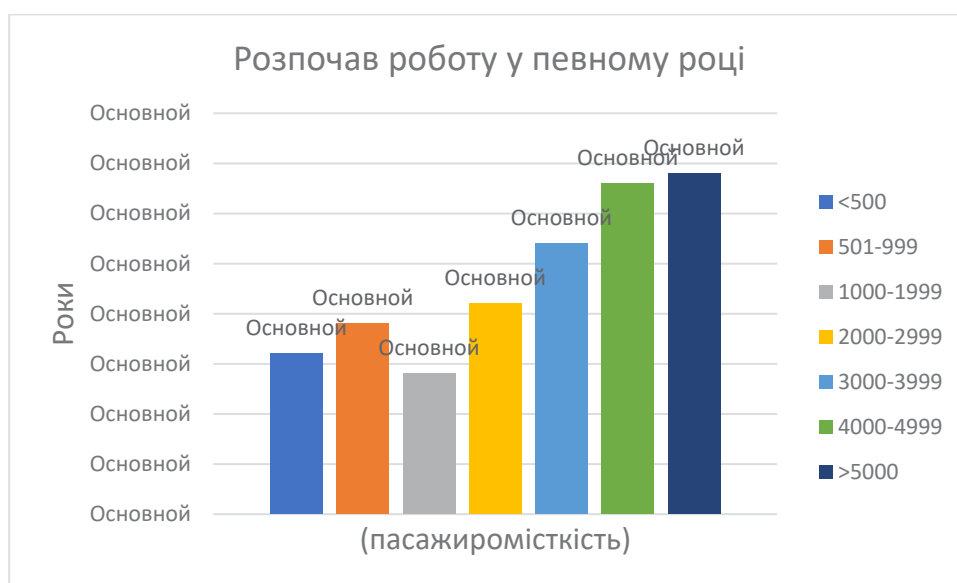


Рис. 7. Місткість круїзних лайнерів

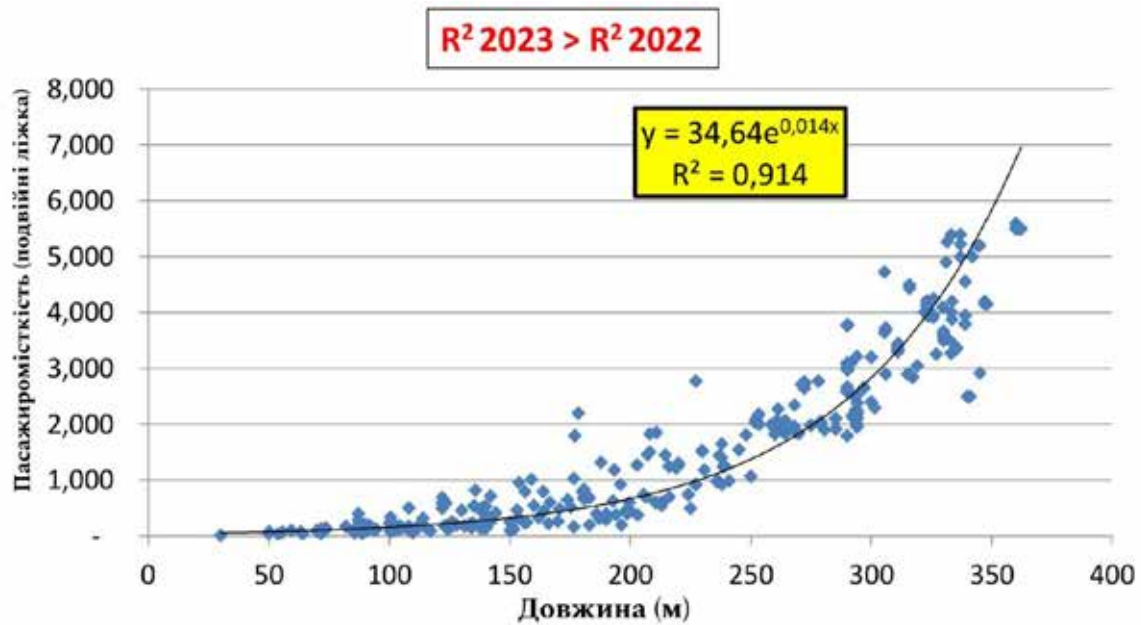


Рис. 8. Пасажири морського-океанського круїзу

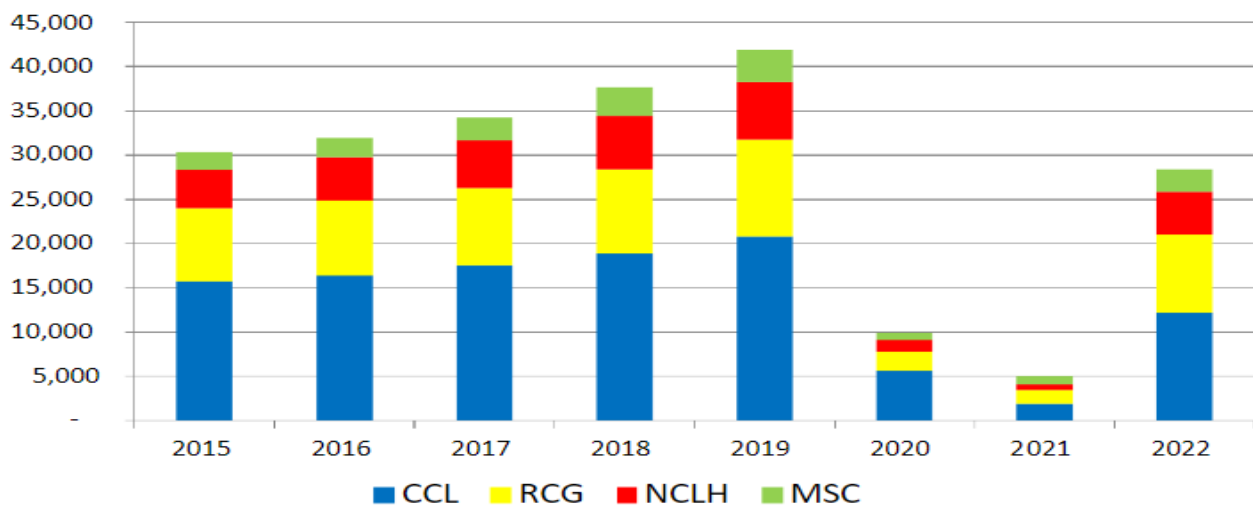


Рис. 9. Прибуток основних круїзних груп у (млн. \$)

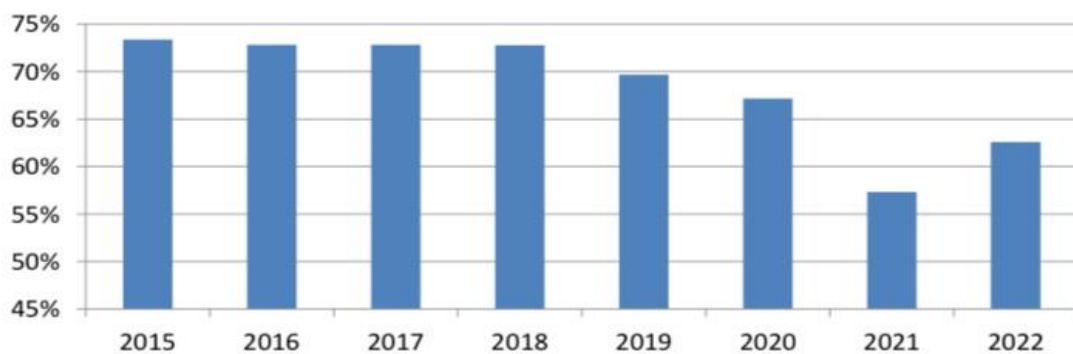


Рис. 10. Доходи 4 основних груп (Квитки, Екскурсії, ДьютиФри)

Прогнозні значення на 2028 р.

Дочірня компанія	Кількість суден	Пасажиromісткість
CCL	18,9%	32,9%
RCL	15,1%	23,5%
MSC	6,2%	12,0%
NCLH	7,8%	10,8%
DisneyCruises	1,6%	2,6%
Дочірня компанія	Кількість суден	Пасажиromісткість
VikingOceanCruises	3,6%	1,9%
AdoraCruises	0,8%	1,8%
VirginVoyages	0,8%	1,3%
Інші	45,3%	13,1%
Усього	100%	100%

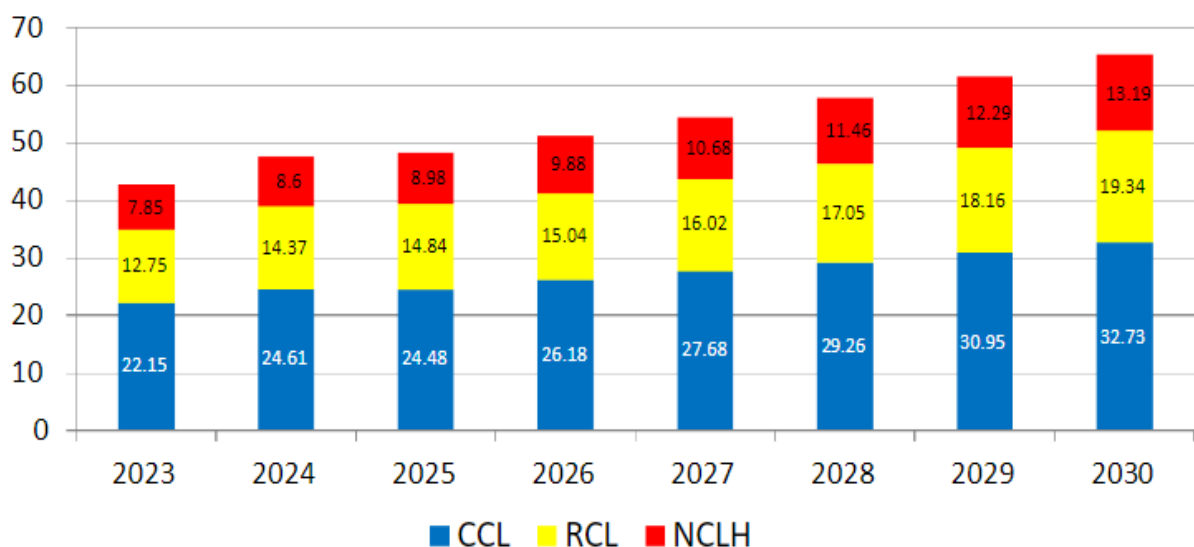


Рис. 11. Прогноз доходів корпораций круїзного ринку

для довготривалих подорожей: ресторанами, магазинами, басейнами, спортзалами і навіть театрами.

Морські судна

Морські пасажирські судна використовуються для перевезень між портами, що розташовані в межах морських акваторій. Це можуть бути як міжпортові перевезення, так і перевезення в межах континентальних вод. Такі судна можуть варіюватися від поромів, що обслуговують маршрути між сусідніми країнами, до більших круїзних суден для коротших подорожей.

Морські судна, в порівнянні з океанськими, мають менший розмір і здатні оперувати в умовах меншого вітрового та хвильового навантаження. Вони зручні для туристичних маршрутів на більших відстанях по морю та для перевезень між островами [9].

Проливні судна

Проливні пасажирські судна призначені для перевезень через вузькі водні шляхи, такі як протоки або канали. Вони відрізняються високою маневреністю та здатністю проходити у вузьких водах з мінімальними габаритами. Зазвичай ці судна використовуються для перевезень у районах з високою щільністю трафіку, таких як Скандинавія, Південний Схід Азії чи Панамський канал. Проливні судна можуть бути як комерційними (для перевезення вантажів), так і пасажирськими, що забезпечують зручність та безпеку під час проходження через обмежені водні простори.

Море-річка (комбіновані судна)

Судна типу «Море-річка» здатні працювати як у морських, так і в річкових умовах, і часто використовуються для перевезень у внутрішніх водах та на річках, що з'єднують морські порти. Ці судна

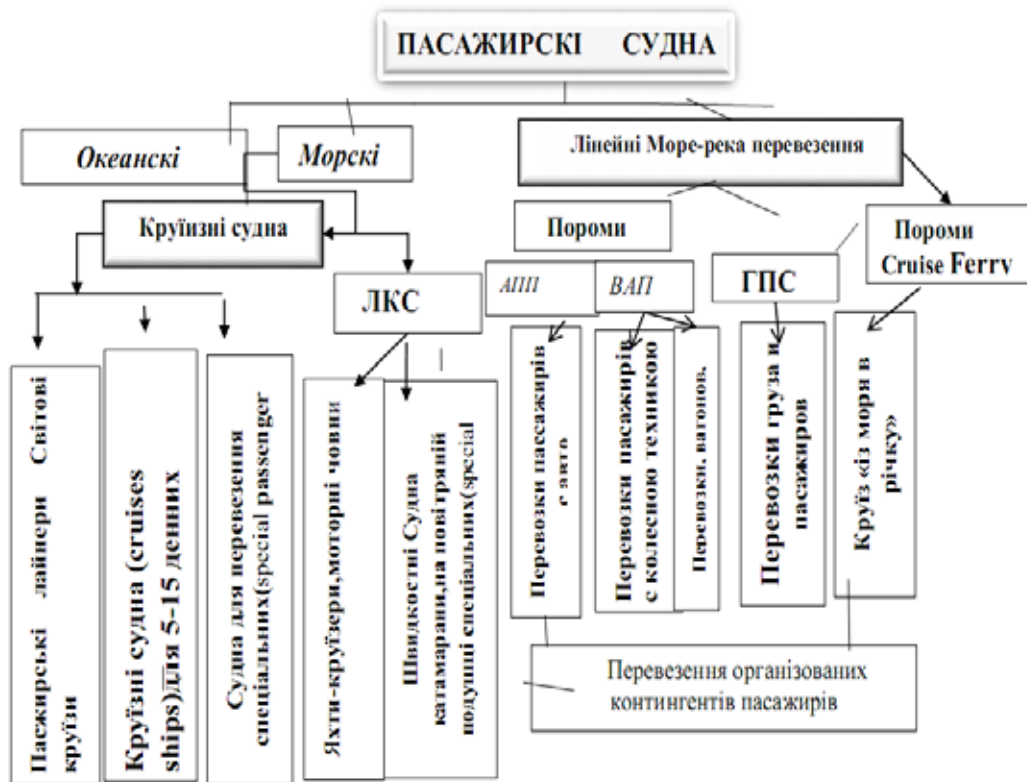


Рис. 12. Класифікація Пасажирських суден

Таблиця 4

Порівняння типів Ro-Ro суден

Тип судна	Призначення	Особливості
Ro-Ro	Тільки для перевезення вантажів та транспортних засобів	Відсутність пасажирських приміщень, фокус на транспортуванні вантажу
Ro-Pax	Перевезення транспортних засобів, пасажирів	Комбіновані судна для перевезення вантажів і людей
High-Speed Ro-Ro	Швидкісні поромні для пасажирів і транспорту	Підвищена швидкість, використовується для коротших маршрутів

Таблиця 5

Порівняння характеристик Pure Ro-Ro, Ro-Pax та High-Speed Ro-Ro

Характеристика	Ro-Ro	Ro-Pax	High-Speed Ro-Ro
Призначення	Перевезення вантажів і транспортних засобів	Перевезення вантажів і пасажирів	Перевезення вантажів і пасажирів на високій швидкості
Перевезення пасажирів	Ні	Так	Так
Типи вантажу	Автомобілі, вантажівки, контейнери	Автомобілі, вантажівки, контейнери	Автомобілі, вантажівки, контейнери
Швидкість	20-25 вузлів	25-30 вузлів	30-40 вузлів
Комфорт для пасажирів	Мінімальний	Високий (каюти, ресторани)	Середній (ресторани, зони відпочинку)
Економічність	Висока (для вантажних перевезень)	Вища (через додаткові послуги)	Вища (через високі швидкості та технології)
Використання	Внутрішньоєвропейські маршрути	Міжконтинентальні та круїзні маршрути	Швидкісні маршрути між портами

повинні мати відповідні конструкційні характеристики, які дозволяють їм ефективно працювати як у відкритому морі, так і у вузьких водах річок.

Цей тип судна може перевозити як пасажирів, так і вантажі, включаючи великогабаритні товари. Вони широко використовуються для туристичних подорожей, а також для транспортування товарів між портами, розташованими в межах річкових систем.

Круїзні судна

Круїзні судна – це спеціалізовані пасажирські судна, що використовуються для проведення розважальних, відпочинкових та культурних круїзів. Вони оснащені великою кількістю зручностей і послуг для пасажирів, таких як ресторани, басейни, спа-послуги, театри, спортзали та інші розважальні заходи. Круїзні судна можуть здійснювати як короткі, так і довготривалі подорожі.

Круїзні судна стали дуже популярними для відпочинку на воді, оскільки вони надають можливість відвідати кілька міст або країн за один рейс, без необхідності постійно змінювати місце перебування. Круїзна індустрія є однією з найбільш швидко зростаючих в секторі туризму.

Пороми

Пороми – це судна, які регулярно перевезають пасажирів, автомобілі, вантажі та інші транспортні засоби між двома або кількома пунктами на постійній основі. Пороми зазвичай використовуються для коротких або середніх за довжиною маршрутів, таких як міжострівні сполучення, а також для перевезення автомобілів між країнами, розташованими на узбережжі.

Пороми мають низьку швидкість, але високу вантажопідйомність, що дозволяє перевозити значні обсяги транспортних засобів і вантажів. Вони є важливою частиною транспортної інфраструктури, особливо в таких регіонах, як Балтійське море, Скандинавія та Південна Європа. Вони також зручні для туристів, які подорожують з автомобілями або іншими транспортними засобами.

Ro-Ro судна

Ro-Ro судна – це тип і вантажних суден, призначених для перевезення транспортних засобів, таких як вантажівки, автомобілі, мотоцикли, а також інші великі вантажі, які можуть легко заїжджати на судно (roll-on) і виїжджати з нього (roll-off). Цей тип судна є надзвичайно популярним для мультимодальних перевезень, оскільки дозволяє зручно і швидко перевантажувати транспортні засоби на різних етапах логістичного процесу. Ro-Ro судна призначені для перевезення автомо-

білів, вантажівок, автобусів, контейнерів, а також пасажирів (у разі необхідності). Такі судна зазвичай використовуються для регулярних перевезень на середні та короткі відстані між портами. Вони дуже зручні для транспортування великогабаритних вантажів і забезпечують швидкий і зручний спосіб транспортування через воду.

Ro-Ro – це судна, які спеціалізуються виключно на перевезенні вантажних транспортних засобів, таких як автомобілі, вантажівки, автобуси, контейнери тощо. Вони не перевозять пасажирів, а їх основна мета – забезпечити швидке і ефективне перевантаження транспортних засобів за допомогою спеціальних нахилених рам্প або ліфтів. Pure Ro-Ro судна часто використовуються для регулярних вантажних перевезень між портами, де не потрібен транспорт для пасажирів, а основна мета – забезпечити швидкість і ефективність перевезення транспортних засобів.

Ro-Pax (Passenger and Roll-on/Roll-off) – це тип суден, який поєднує функції Ro-Ro (для перевезення транспортних засобів) і пасажирського **порому**. Це комбіновані судна, що забезпечують перевезення як транспортних засобів (автомобілів, вантажівок, автобусів), так і пасажирів. Ro-Pax судна використовуються для регулярних перевезень як пасажирів, так і транспортних засобів. Вони ідеально підходять для маршрутів, де є потреба в перевезенні великої кількості автомобілів і вантажів разом з пасажирами. Як і Ro-Ro судна, Ro-Pax судна оснащені рампами, які дозволяють транспортним засобам заїжджати і виїжджати без використання кранів. Водночас, на таких судах є спеціальні каюти, ресторани, зони для відпочинку і інші умови для комфортного перебування пасажирів під час подорожі.

High-Speed Ro-Ro – це тип Ro-Ro суден, призначених для перевезення транспортних засобів і вантажів, але з підвищеною швидкістю перевезення. Вони поєднують технологію Ro-Ro, що дозволяє швидко завантажувати і вивантажувати транспортні засоби, з потужними двигунами, що забезпечують високу швидкість на воді. High-Speed Ro-Ro судна використовуються для перевезень між портами на короткій та середній відстані, де важливо забезпечити не тільки перевезення вантажів і транспорту, але й знизити час подорожі. Це можуть бути маршрути для швидкого транспортування пасажирів з їхніми транспортними засобами або вантажів.

Країни Північної Америки активно впроваджують зелені технології, що знижують вплив на навколишнє середовище. Регіон відзначається

стабільним попитом на перевезення пасажирів і вантажів, особливо на маршрутах між США та Канадою, а також між США та Карибським басейном. Останніми роками зростає використання високошвидкісних поромів та поромів з електричними двигунами.

Європейський ринок зосереджений на сталих морських перевезеннях, і країни Європи активно працюють над впровадженням екологічних стандартів. Це включає впровадження поромів з низькими викидами CO₂, а також розвиток інфраструктури для зниження впливу на навколишнє середовище. Популярні маршрути в Європі охоплюють перевезення між Великою Британією і континентальними країнами, а також між Скандинавськими країнами, Північним Європейським регіоном та Середземномор'ям. Вже кілька років поспіль спостерігається збільшення попиту на поромні перевезення, що пов'язано з розвитком туризму та бізнесу, а також з переходом на більш екологічні типи суден.

Європи активно працюють над впровадженням екологічних стандартів. Це включає впровадження поромів з низькими викидами CO₂, а також розвиток інфраструктури для зниження впливу на навколишнє середовище. Популярні маршрути в Європі охоплюють перевезення між Великою Британією і континентальними країнами, а також між Скандинавськими країнами, Північним Європейським регіоном та Середземномор'ям. Вже кілька років поспіль спостерігається збільшення попиту на поромні перевезення, що пов'язано з розвитком туризму та бізнесу, а також з переходом на більш екологічні типи суден [10].

Висновки. Проводився аналіз сучасного стану світового круїзного ринку [1, 2]. Виявлені основні тенденції еволюції засобів пасажирських пере-

везень світових круїзних компаній. Нарешті, були представлені прогнози щодо кількості круїзних пасажирів, які будуть перевезені в найближчі роки (2023–2028) і щодо фінансових показників «великої трійки» (2023–2030). Сильна і стійка галузь: Стійке та постійне зростання протягом останніх 50 років, причому круїзний сектор виявляє більшу стійкість у періоди спаду, ніж інші сектори. Надана класифікаційна схема засобів пасажирських перевезень за формами організації перевезень та видами вантажів-пасажирів, автомобілі, трейлери, комбіновані, засоби [9, 10].

Сектор характеризує відповідальність і стійкість: Круїзи є одним із найбезпечніших способів подорожувати і стають одними з найбільш відповідальних та найкращих способів побачити світ, оскільки круїзні лінії просувають амбітну програму стійкого розвитку. Світовий ринок поромів демонструє значну регіональну диверсифікацію, що залежить від попиту на перевезення, інфраструктури портів і екологічних вимог. Основні регіони, які визначають розвиток цього ринку, включають Північну Америку, Європу і Балтійський регіон. Північна Америка домінує на ринку поромних перевезень з часткою в 39%. Це досягається завдяки розвитку інфраструктури та високому рівню інвестицій в екологічні інновації. Країни Північної Америки активно впроваджують зелені технології, що знижують вплив на навколишнє середовище. Регіон відзначається стабільним попитом на перевезення пасажирів і вантажів, особливо на маршрутах між США та Канадою, а також між США та Карибським басейном. Останніми роками зростає використання високошвидкісних поромів та поромів з електричними двигунами. Європейський ринок зосереджений на сталих морських перевезеннях, і країни [11].

Список літератури:

1. Cruise Market Ward, D. The complete guide to cruising & cruise ships. Berlitz Publishing Company, London, UK. 2023.
2. <https://www.jpmorgan.com/insights/global-research/travel/cruise-outlook>
3. Pallis, A.A., Vaggelas G.K. The changing geography of cruise shipping. In: Wilmsmeier, G., Monios, J., Browne, M., Woxenius, J. (eds.) *Geographies of waterborne transport: Transitions from transport to mobilities*, 170-191. Cheltenham: Edward Elgar. 2023. pp. 170-191.
4. Michael, E. Porter. Michael E. Porter on Competition. М.: Вільямс, 2020. 608 с.
5. Farakhutdinov, Sh. F., Bushuyev, A.S. Processing and Analysis of Sociological Research Data in the SPSS 17.0 Package. Course of lectures : tutorial / Sh. F. Farakhutdinov, A. S. Bushuyev. – Tyumen : TyumSOGU, 220 p. ISBN 978-5-9961-0414-7. 2011.
6. Thomas F. Wallace, Michael H. Kremzar. ERP: making it happen. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
7. Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2007). Maritime Transportation. 14(06). [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14004-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14004-9).
8. О.Г. Шибаєв, Г.М. Сільванська, Ю.В. Михайлова, Г.В. Карп. Системи Підтримки Прийняття рішень як ефективний інструмент реалізації управління роботою круїзного та лінійного судноплавства. Укра-

їна: Вісник Херсонський національний технічний університет. Серія «Транспортні системи та технології». 2023. Т. 1. Частина 1. С. 80-91. https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu

9. Бондаренко, В. Інноваційні технології в поромних перевезеннях: Перспективи розвитку. 2017. Науковий вісник морського транспорту, 29(1), С. 120-128.

10. Мельник, І., Шевченко, А. Екологічна безпека морських перевезень: сучасний стан та шляхи поліпшення. 2021. Київ: Видавництво ТехноЛогія.

Silvanska H.M. MODERN CLASSIFICATION AND STRUCTURE OF PASSENGER TRANSPORTATION

In the article considered question of key factors development the global passenger and cruise market shipping. The classification and structure of means is presented. passenger transportation. Provided by information on the current state of passenger and cruise facilities shipping Determined changes in his structure by regional passenger flows.

Strategic are characterized directions activities leading cruise companies, defined their market priorities. Analyzed data of plans for renewal cruise fleet by 2027. Analyzed rapid development cruise tourism in the world in recent decades. During the last decades market marine cruises demonstrated significant increase and stable growth. On the world the cruise market is observed very high concentration of the fleet in the hands of a few cruise companies that control almost 85% of the cruise market services. Cruise travel reached in 2023 – 31.7 million passengers, in 2027 it is predicted that number cruise passengers will grow to almost 40 million. Development cruise tourism has synergistic effect for development local economy: increase revenues to budgets all levels; creation new workers places in the areas of service, advertising tourist opportunities region (country as a whole); infrastructure that provides opportunity for international cooperation; involvement investment in development transport and port infrastructure etc. All of the above designated requires search effective mechanism management functioning passenger fleet (cruise ships) services and linear services) New tourist strategies, maximize socio-economic benefits. The purpose of the study is to analyze current state of the global market for passenger transportation and justification of the assessment methodology factors that affect competitiveness cruise companies.

Key words: *passenger transportation means, classification, Database, influence factors.*

Степанов О.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Волобуєва Т.В.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Жданов О.О.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

ОПТИМАЛЬНА ПЕРІОДИЧНІСТЬ ЗАМІНИ АГРЕГАТІВ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ ПРИ ДОСЯГНЕННІ ЗАДАНОГО НАПРАЦЮВАННЯ

Стаття присвячена концепції оптимальної періодичності заміни агрегатів вантажного авто-транспортного при досягненні заданого напрацювання. Показано, що в основу чинної системи планово-попереджувальних ремонтів автотранспорту покладено ремонтні цикли, які розроблені згідно з галузевою методикою розробки нормативів потреби в запасних частинах до автомобілів на ремонтно-експлуатаційні потреби. Але отримані за допомогою різних критеріїв оптимізації ремонтні цикли вантажного автотранспорту не враховують його технічний стан, що змінюється в процесі експлуатації. З'ясовано, що розроблені плани ремонтів технологічного вантажного автотранспорту часто не відповідають фактичній потребі в запасних частинах, трудових ресурсах та періодичності планових ремонтів. Це призводить до збільшення аварійних простоїв вантажного автотранспорту та різкого зростання експлуатаційних витрат. Дослідження доводить, що причиною заміни агрегатів технологічного вантажного автотранспорту є підвищена швидкість зношування, яка виникає внаслідок запиленості повітря, порушення режимів обслуговування, правил експлуатації чи використання неякісної оливи. Для підтримки показників надійності, з урахуванням умов експлуатації, організації ремонту, методів планування та способів встановлення періодичності, обсягів ремонтно-профілактичних робіт, які забезпечують максимальний ефект від їх використання, необхідно застосовувати ремонт та обслуговування відповідно до чинного технічного стану вантажного автотранспорту. Зроблено висновок, що запропонована концепція технології ремонтно-профілактичного обслуговування вантажного автотранспорту передбачає попереджувальні заміни елементів при досягненні ними заданого напрацювання та допускає аварійні заміни при настанні відмов.

Ключові слова: вантажний автотранспорт, технічний стан, агрегат, ремонтні цикли, ремонтно-профілактичне обслуговування.

Постановка проблеми. В основу чинної системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР) вантажного автотранспорту (надалі – автотранспорту) покладено ремонтні цикли, що розроблені згідно з галузевою методикою розробки нормативів потреби в запасних частинах до автомобілів на ремонтно-експлуатаційні потреби [1–4, 8–10]. Але отримані за допомогою різних критеріїв оптимізації ремонтні цикли автотранспорту не враховують технічний стан автотранспорту, що змінюється в процесі експлуатації. Це призводить до того, що розроблені плани ремонтів автотранспорту часто не відповідають фактичній потребі в запасних частинах, трудових ресурсах та періодичності планових ремонтів [11]. У результаті збільшуються ава-

рійні простої автотранспорту та різко зростають експлуатаційні витрати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різноманітні наукові праці О. В. Бажинова, В. Н. Варфоломєєва, І. Є. Дюміна, А. К. Дьячкова, П. Е. Дьяченко, М. А. Єлизаветіна, М. С. Ждановського, О. І. Ісаєва, О. П. Кравченка, І. В. Крагельського, Б. І. Костецького, А. Т. Лебедева, Л. В. Назарова, М. А. Подригало, А. Н. Туренка й ін., були присвячені проведенню ряду досліджень, які з'ясовують фізичну сутність процесів та впливають на надійність автотранспорту.

Науковцями проаналізовано стратегії та систему ППР, які включають різноманітні заходи для забезпечення надійності автотранспорту. Ці заходи впроваджувалися на різних підприємствах

і давали позитивні результати. Проте відсутність контролю з боку заводу-виробника негативно позначається на надійності та довговічності автотранспорту. Брак матеріальних засобів і кваліфікованих кадрів призводить до порушень режимів технічного обслуговування і ремонту (ТОР), що, у свою чергу, знижує ресурс автотранспорту. Це особливо впливає на роботу технологічного автотранспорту.

Постановка завдання. Метою статті є розгляд концепції оптимальної періодичності заміни агрегатів вантажного автотранспорту при досягненні заданого напрацювання.

Виклад основного матеріалу. Згідно з Положенням про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту [1], існує чотири основні способи визначення та встановлення періоду заміни кожного окремого агрегату автотранспорту:

1) заміна проводиться лише після відмови агрегату;

2) заміна проводиться за планом. Зазвичай застосовується стратегія, яка передбачає проведення планової попереджувальної заміни агрегату після досягнення ним певного напрацювання та аварійну заміну в разі відмови. Новий період заміни агрегату визначається незалежно від того, чи була остання заміна плановою або аварійною;

3) заміна агрегату в процесі експлуатації відбувається після відмови агрегату, але при цьому встановлюються регламентовані періоди між капітальними ремонтами;

4) заміна агрегату здійснюється на підставі результатів технічної діагностики, із врахуванням ознак, що свідчать про наближення його граничного стану.

Необхідно зазначити, що причиною заміни агрегатів технологічного автотранспорту є підвищене зношування, яке виникає через велику запиленість повітря, порушення режимів обслуговування, правил експлуатації або використання неякісної оливи [7, 8].

Аналіз наукових джерел щодо умов експлуатації, організації ремонту, методів планування

та способів визначення періодичності й обсягів ремонтно-профілактичних робіт для автотранспорту показує, що для підтримки надійності автотранспортних засобів, що забезпечують максимальну ефективність їх використання, необхідно проводити ремонт та обслуговування відповідно до поточного технічного стану автотранспорту [3, 5–9].

Для створення математичної моделі ремонту будемо розглядати автотранспорт у вигляді структурної схеми, що складається з послідовно взаємодійних елементів та з відомими функціями розподілу напрацювання. Відомо, що ймовірність безвідмовної роботи автотранспорту за такої схеми дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи частин його елементів.

Враховуючи позитивний досвід ремонтних автопідприємств для моделі ремонту приймемо концепцію технології ремонтно-профілактичного обслуговування автотранспорту, яка передбачає попереджувальні заміни елементів при досягненні ними заданого напрацювання та допускає аварійні заміни при настанні відмов.

За критерій оптимізації K до періодів попереджувальних заміन груп елементів для зазначеної технології прийнято мінімум сумарних витрат, що обумовлені плановими A^{nl} та аварійними A^{av} замінами елемента на одиницю напрацювання автотранспорту

$$K = \frac{A^{nl} \cdot P(T) + A^{av} \cdot F(T)}{\int_0^T P(t) dt}. \quad (1)$$

Пошук оптимального варіанта заміни проведемо шляхом перебору варіантів заміни елементів у різних поєднаннях.

При заміні одного i -го елемента критерій оптимізації має вигляд

$$K_i = \frac{A_i^{nl} \frac{P_i(T_i - T_i^3 + \Delta T)}{P_i(T_i - T_i^3)} + A_i^{av} [1 - \frac{P_i(T_i - T_i^3 + \Delta T)}{P_i(T_i - T_i^3)}] + \tau \sum_{s=1}^{\omega} T_{TPs}}{\int_0^{\Delta T} \prod_{k=1}^N \frac{P_k(T_k - T_k^3 + \Delta t)}{P_k(T_k - T_k^3)} d(\Delta t)}. \quad (2)$$

Для i -го та j -го елементів

$$K_{i,j} = \left[A_i^{nl} \frac{P_i(T_i - T_i^3 + \Delta T)}{P_i(T_i - T_i^3)} + A_i^{nl} \frac{P_j(T_j - T_j^3 + \Delta T)}{P_j(T_j - T_j^3)} + A_i^{av} [1 - \frac{P_i(T_i - T_i^3 + \Delta T)}{P_i(T_i - T_i^3)}] + A_j^{av} [1 - \frac{P_j(T_j - T_j^3 + \Delta T)}{P_j(T_j - T_j^3)}] + \tau (\sum_{s=1}^{\omega} T_{mps} - T_{n3}) \right] \cdot \frac{\Delta T}{\int_0^{\Delta T} \prod_{k=1}^N \frac{P_k(T_k - T_k^3 + \Delta t)}{P_k(T_k - T_k^3)} d(\Delta t)}. \quad (3)$$

Для i -го... m -го елементів

$$K_{i...m} = \left[A_i^{nl} \frac{P_i(T_i - T_i^3 + \Delta T)}{P_i(T_i - T_i^3)} + \dots + A_m^{nl} \frac{P_m(T_m - T_m^3 + \Delta T)}{P_m(T_m - T_m^3)} + A_i^{av} \left[1 - \frac{P_i(T_i - T_i^3 + \Delta T)}{P_i(T_i - T_i^3)} \right] + \dots + A_m^{av} \left[1 - \frac{P_m(T_m - T_m^3 + \Delta T)}{P_m(T_m - T_m^3)} \right] + \tau \left(\sum_{s=1}^{\omega} T_{mps} - (m-1)T_{nz} \right) \right] \frac{\Delta T}{\int_0^{\Delta T} \prod_{k=1}^N \frac{P_k(T_k - T_k^3 + \Delta t)}{P_k(T_k - T_k^3)} d(\Delta t)}, \quad (4)$$

де A^{nl} – витрати при плановій заміні елемента;

A^{av} – витрати при аварійній заміні елемента;

$\frac{P(T - T^3 + \Delta T)}{P(T - T^3)}$ – ймовірність безвідмовної роботи елемента в період між замінами ΔT ;

$T_{i,j,...}$ – сумарне напрацювання i -го та j -го елементів на момент розрахунку;

$T_{i,j,...}^3$ – сумарний термін служби з урахуванням попередніх замін i -го та j -го елементів;

$\int_0^{\Delta T} \prod_{k=1}^N \frac{P_k(T_k - T_k^3 + \Delta t)}{P_k(T_k - T_k^3)} d(\Delta t)$ – математичне очікування напрацювання автотранспорту за період ΔT ;

τ – вартість ремонту, люд. г.;

T_{mps} – трудомісткість монтажу-демонтажу s -го елемента;

ω – кількість додаткових елементів, що підлягають монтажу-демонтажу при заміні цієї групи елементів;

T_{nz} – початковий і завершальний час на підготовку самоскида перед ремонтом та після ремонту;

m – число одночасно замінюваних елементів.

З метою знаходження оптимального варіанта групової заміни елементів необхідно визначити критерій оптимізації для всіх можливих поєднань елементів групи для одночасної заміни. Позначимо число таких поєднань

$$\sum_{K=1}^N C_N^K = 2^N - 1 \quad (5)$$

Мінімізуючи вирази (2), (3), (4), отримаємо значення ΔT_{opt} для кожного поєднання елементів, що одночасно замінюються. Використовуючи вирази (2), (3), (4), обчислимо для кожного ΔT_{opt} відповідні мінімальні значення критеріїв оптимізації K_{min} .

Найменший з отриманих критеріїв відповідає бажаному оптимальному поєднанню елементів у групі для одночасної заміни. Відповідний цьому критерію період ΔT_{opt} є оптимальним періодом заміни елементів, номери яких визначаються за індексом, за даним критерієм оптимізації.

Сучасний автотранспорт складається з багатьох деталей (елементів). Відповідно, визначити

оптимальні терміни замін кожної деталі складно. Водночас досвід показує, що нема потреби планувати період заміни для кожної деталі автотранспорту.

З метою скорочення числа елементів у розрахунковій моделі автотранспорту було сформульовано вимоги до елементів, для яких доцільно визначати оптимальні періоди замін розрахунковим шляхом, тобто:

– для кожного елемента структурної схеми має бути відома функція розподілу, напрацювання;

– елементи структурної схеми повинні взаємодіяти послідовно, тобто. відмова будь-якого з них має призводити до відмови машини в цілому;

– елемент повинен мати властивість незалежності, тобто при його заміні чи відмові показники надійності інших елементів не повинні змінюватися.

Вплив, який надають параметри функцій розподілу напрацювання на структурну схему, представлені для стратегії ремонту. Стратегія передбачає планову попереджувальну заміну елемента, якщо він досягає заданого напрацювання та непланову заміну при настанні відмови.

Враховуючи, що співвідношення витрат на планові та непланові заміни може бути лише величиною позитивною, приймемо умову $A^{nl} < A^{av}$. При цьому умова доцільності планової заміни може бути подана у вигляді наступної нерівності $0 < E < 1$.

Дослідження коефіцієнта вартості E залежно від характеру зміни інтенсивності відмов, характерної для елементів автотранспорту, показало, що:

– для елементів, що мають експоненційний розподіл напрацювання, а також розподіл Вейбулла з параметром форми $b \leq 1$ та гамма-розподіл з параметром форми $m \leq 1$, яким відповідають постійна або монотонна інтенсивність відмов, що спадає, оптимальних періодів замін не існує;

– елементи з нормальним розподілом та логарифмічно нормальним в інтервалі від нуля до значення напрацювання (розподіл Вейбулла) при параметрі $b > 1$ та гамма-розподіл при параметрі $m > 1$, мають інтенсивність відмов, що зростає.

ють, можуть мати при $A^{nl} < A^{av}$ мінімум критерію оптимізації та, отже, для цих елементів існують оптимальні періоди заміни;

– якщо витрати на планову та аварійну заміни елемента приблизно однакові, то не існує такого значення періоду заміни ΔT , за якого критерій K досяг би мінімального значення, тобто, в цьому випадку не існує оптимального значення періоду заміни.

Враховуючи отримані закономірності, всі елементи автотранспорту можна поділити на такі групи:

а) елементи, технічний стан яких може бути оцінений легко доступними методами та засобами;

б) елементи, вартість заміни яких у плановому та неплановому порядку однакова;

в) елементи з постійною або спадною інтенсивністю відмов;

г) елементи з інтенсивністю відмов, що зростають.

Елементи, що належать до груп «а», «б», «в» повинні замінюватися при настанні відмов. Для елементів групи «г» повинні бути встановлені оптимальні періоди заміни за техніко-економічними критеріями, що складені для структурної схеми конкретного автомобіля.

Витрати на планову заміну елемента мають наступний вигляд

$$A^{nl} = \sum C_z + C_{накл} + C_{эл}^{сп}, \quad (6)$$

де $\sum C_z$ – сумарні витрати на заробітну плату;

$C_{накл}$ – накладні витрати;

$C_{эл}^{сп}$ – вартість запасних частин та матеріалів.

Викликані відмовою витрати на заміну A^{av} перевищують витрати під час планової заміни на величину шкоди від втрати кількості вивезеного вантажу. Крім того, вони перевищують витрати, що зумовлені неплановими втратами на утримання автотранспорту, що не працює.

Таким чином концепція оптимальної періодичності заміни агрегатів автотранспорту передбачає попереджувальні заміни елементів при досягненні ними заданого напрацювання та допускає аварійні заміни при настанні відмов.

Визначити експлуатаційні витрати на підставі розробленої системи ремонтно-профілактичного обслуговування автотранспорту можна за допомогою апарату математичного моделювання. При цьому зазначимо, що характер зміни вартості деталей та експлуатаційних витрат до і після проведення ремонтного впливу залежно від пробігу мають нелінійний характер. Ці залеж-

ності можуть бути описані рівняннями регресії наступного виду

$$Y = A_0 X^0 + A_1 X^1 + A_2 X^2 + \dots + A_n X^n + \dots, \quad (7)$$

де X – значення аргументу;

A – коефіцієнти регресії.

Функція, що представлена у вигляді суми сходящого статечного ряду, дозволяє знайти її значення з будь-яким ступенем точності. Для цього формулу (7) необхідно представити у вигляді системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Методи рішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь, що використовуються на практиці, можна умовно розділити на дві групи: точні методи та методи послідовних наближень. Найбільший інтерес при вирішенні технічних завдань представляють точні методи.

Точні методи характеризуються тим, що з їх допомогою можливо, проробивши кінцеве число операцій, одержати точні значення невідомих коефіцієнтів. При цьому передбачається, що коефіцієнти та праві частини системи точні, а всі обчислення виробляються без округлень.

Найпростішим з точних методів є метод винятків. Перетворюючи рівняння системи, добиваємося того, що у всіх рівняннях, крім одного, буде виключено одне з невідомих. Потім виключаємо інше невідоме, третє тощо. У результаті виходить система, рішення якої не становить особливих труднощів. До цього методу відносяться: схема Гауса з вибором головного елемента; компактна схема Гауса; схема Жордана зі зворотним ходом; схема Жордана без зворотного ходу й ін.

У даній роботі застосована схема Жордана без зворотного ходу. Перевага цієї схеми полягає в тому, що при її використанні не потрібно зворотний хід при визначенні невідомих коефіцієнтів.

У рівнянні (7) відомими є значення Y і X , а невідомими – значення коефіцієнтів $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$. Оскільки це рівняння є статечним з кількома невідомими, його рішення можливе тільки після перетворення до виду системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Для цього введемо нові позначення

$$Y = y, A_0 = a_1, A_1 = a_2, A_2 = a_3, \dots, A_n = a_n, X^0 = x_1, X^1 = x_2, \\ X^2 = x_3, \dots, X^{n-1} = x_n.$$

Після перетворень рівняння (7) набуває вигляду наступної системи лінійних рівнянь алгебри

$$\left. \begin{aligned} y_1^{(0)} &= a_{11}x_{11}^{(0)} + a_{12}x_{12}^{(0)} + \dots + a_{1n}x_{1n}^{(0)} \\ y_2^{(0)} &= a_{21}x_{21}^{(0)} + a_{22}x_{22}^{(0)} + \dots + a_{2n}x_{2n}^{(0)} \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \\ y_i^{(0)} &= a_{i1}x_{i1}^{(0)} + a_{i2}x_{i2}^{(0)} + \dots + a_{in}x_{in}^{(0)} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

де i – порядковий номер рівняння в системі лінійних рівнянь ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

Будуємо матрицю і вносимо в неї значення x при невідомих a_i значення y (Матриця 1). Вибираємо невідоме, яке необхідно виключити й рівняння, за допомогою якого будемо виробляти цей виняток.

Матриця 1

№ п/п	a_{i1}	a_{i2}	...	a_{in}	y_i
1	$x_{11}^{(0)}$	$x_{12}^{(0)}$	...	$x_{1n}^{(0)}$	$y_1^{(0)}$
2	$x_{21}^{(0)}$	$x_{22}^{(0)}$	...	$x_{2n}^{(0)}$	$y_2^{(0)}$
...	...	...	...	...	...
i	$x_{i1}^{(0)}$	$x_{i2}^{(0)}$	...	$x_{in}^{(0)}$	$y_i^{(0)}$

Припустимо, що вибрано i -е рівняння і невідоме a_i . Розділивши кожен частину i -го рівняння системи рівнянь (8) на значення $x_{in}^{(0)}$, отримаємо наступне

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{y_i^{(0)}}{x_{in}^{(0)}} &= \frac{x_{i1}^{(0)}}{x_{in}^{(0)}} \cdot a_{i1} + \frac{x_{i2}^{(0)}}{x_{in}^{(0)}} \cdot a_{i2} + \dots + \frac{x_{ik}^{(0)}}{x_{in}^{(0)}} \cdot a_{ik} + \dots + \frac{x_{in}^{(0)}}{x_{in}^{(0)}} \cdot a_{in}, \\ y_i^{(1)} &= x_{i1}^{(1)} \cdot a_{i1} + x_{i2}^{(1)} \cdot a_{i2} + \dots + x_{ik}^{(1)} \cdot a_{ik} + \dots + x_{in}^{(1)} \cdot a_{in} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

де $x_{ik}^{(1)} = \frac{x_{ik}^{(0)}}{x_{in}^{(0)}}$ ($k=1,2,3,\dots,n$; $x_{in}^{(1)}=1$; k – порядковий номер коефіцієнта в i -тому рівнянні).

Віднімаємо з кожного додатка системи рівнянь (8), крім i -го, рівняння (9). При цьому рівняння (9) необхідно попередньо помножити на значення того рівняння системи рівнянь (8), з якого воно буде відніматися.

У результаті виконаних перетворень, отримаємо наступне

$$\left. \begin{aligned} y_1^{(0)} - \frac{y_1^{(0)}}{x_{in}^{(0)}} \cdot x_{1n}^{(0)} &= a_{11}x_{11}^{(0)} - \frac{x_{11}^{(0)}}{x_{in}^{(0)}} \cdot x_{1n}^{(0)} a_{i1} + \dots + \\ &+ a_{1k}x_{1k}^{(0)} - \frac{x_{1k}^{(0)}}{x_{in}^{(0)}} \cdot x_{1n}^{(0)} a_{ik} + \dots + a_{1n}x_{1n}^{(0)} - \frac{x_{1n}^{(0)}}{x_{in}^{(0)}} \cdot x_{1n}^{(0)} a_{in}, \\ y_2^{(0)} - \frac{y_1^{(0)}}{x_{2n}^{(0)}} \cdot x_{2n}^{(0)} &= a_{21}x_{21}^{(0)} - \frac{x_{21}^{(0)}}{x_{2n}^{(0)}} \cdot x_{2n}^{(0)} a_{i2} + \dots + \\ &+ a_{2k}x_{2k}^{(0)} - \frac{x_{2k}^{(0)}}{x_{2n}^{(0)}} \cdot x_{2n}^{(0)} a_{ik} + \dots + a_{2n}x_{2n}^{(0)} - \frac{x_{2n}^{(0)}}{x_{2n}^{(0)}} \cdot x_{2n}^{(0)} a_{in}, \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

При цьому систему рівнянь (8) (крім i -го рівняння) можна записати у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} y_1^{(1)} &= a_{11}x_{11}^{(1)} + a_{12}x_{12}^{(1)} + \dots + a_{1n}x_{1n}^{(1)} \\ y_2^{(1)} &= a_{21}x_{21}^{(1)} + a_{22}x_{22}^{(1)} + \dots + a_{2n}x_{2n}^{(1)} \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \\ y_i^{(1)} &= a_{i1}x_{i1}^{(1)} + a_{i2}x_{i2}^{(1)} + \dots + a_{in}x_{in}^{(1)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

У новій системі рівнянь (11), всі коефіцієнти а при x змінили свої початкові значення, а при значенні x_n ці коефіцієнти дорівнюють нулю, крім одного (i -го рівняння), рівного одиниці. Виходячи з системи (11) будуємо нову матрицю (Матриця 2) і всі нові значення коефіцієнтів при невідомих вносимо в неї.

Матриця 2

№ п/п	a_{i1}	a_{i2}	...	a_{in}	y_i
1	$x_{11}^{(0)}$	$x_{12}^{(0)}$	...	0	$y_1^{(0)}$
2	$x_{21}^{(0)}$	$x_{22}^{(0)}$	...	0	$y_2^{(0)}$
...	...	...	...	0	...
i	$x_{i1}^{(0)}$	$x_{i2}^{(0)}$	...	1	$y_i^{(0)}$

Проробивши аналогічним чином виняток невідомого a_{n-1} в $i-1$ рівнянні, невідомого a_{n-2} в $i-2$ рівнянні, до невідомого a_1 , в 1-му рівнянні, матимемо на місці правих частин значення шуканих невідомих.

Матриця, по закінченні рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь після S перетворень, прийме наступний вигляд (Матриця S).

Матриця S

№ п/п	a_{i1}	a_{i2}	...	a_{in}	y_i
1	1	0	0	0	$y_1^{(0)}$
2	0	1	0	0	$y_2^{(0)}$
...	0	0	1	0	...
i	0	0	0	1	$y_i^{(0)}$

У матриці S містяться всі необхідні коефіцієнти для розв'язку системи алгебраїчних лінійних рівнянь (8). У кожному з рівнянь один з коефіцієнтів має значення одиниці, а інші – нулі. У крайньому правому стовпці матриці S розміщені коефіцієнти рівняння (7). Підставивши знайдені значення коефіцієнтів у рівняння (7), можна обчислити залишкову вартість двигуна та експлуатаційні витрати для будь-якого значення пробігу двигуна автотранспорту.

Задача визначення невідомих коефіцієнтів за методом Жордана без зворотного ходу вирішується відповідно до розробленого алгоритму:

- викликаємо підпрограму введення початкових значень при невідомих коефіцієнтах. Тут же проводиться контроль на цифру (VVOOD COF);
- побудова основної матриці (POSTR);
- створюємо допоміжну матрицю після введення в ступінь початкових коефіцієнтів (ZAP);
- встановлюємо кількість повторних циклів до визначення коефіцієнтів (FOR I=1 TO 3);

– вибираємо головний елемент (MAX). Головним елементом є максимальне значення в будь-якому стовпці матриці, крім останнього, після кроку 3;

– знаходимо значення допоміжної матриці після вибору головного елемента (NAHM). Значення допоміжної матриці по кожному колонку визначаються шляхом ділення значень коефіцієнтів стовпця на максимальне значення коефіцієнта по цьому рядку;

– визначаємо нові коефіцієнти допоміжної матриці по крайньому правому стовпчику (I THMM). Обчислення згідно з кроком 5–8 виробляємо до тих пір, поки не будуть визначені коефіцієнти. Коефіцієнти вважаються знайденими, якщо по діагоналі зверху вниз у матриці будуть стояти значення 1, у всіх інших рядках – значення 0. У крайньому правому стовпці будуть знаходитися значення коефіцієнтів;

– виробляємо пересилання значень знайдених коефіцієнтів в робочий масив (PEREST);

– визначаємо значення кінцевих мінімумів, включаючи перевірку наявності коренів (XMIN YMIN);

– виводимо на друк значення знайдених кінцевих мінімумів (X MIN);

– кінець обробки інформації.

Наведений формалізований опис процесів технічної експлуатації автотранспорту дозволяє здійснити функціональне моделювання розглянутих

процесів зміни їх технічного стану та процесів технічної експлуатації.

Висновки. Система ППР на автотранспортних підприємствах базується на циклічних процесах, які мають стійку структуру та тривалість. Однак ця система не враховує технічний стан автотранспорту, що змінюється під час експлуатації.

Розроблені графіки та плани ремонтних робіт, що базуються на принципах ППР, часто не відповідають реальним потребам технічного стану автотранспорту. Це виникає через те, що вони не завжди забезпечують належну періодичність виконання ремонтних заходів, а також не враховують повного обсягу необхідних робіт, потреби у запасних частинах та трудових ресурсах. Такі недоліки можуть призводити до виникнення непередбачених аварійних простоїв автотранспорту, що, у свою чергу, спричиняє збільшення експлуатаційних витрат і порушення в роботі всієї технологічної ланки транспортного процесу.

Як результат, це знижує ефективність функціонування ремонтного автотранспортного підприємства та створює ризики для безперебійного виконання планових завдань. Після детальної оцінки всіх чинників можна буде створити надійну й ефективну систему, яка дозволяє мінімізувати ризики та оптимізувати витрати на ремонт і обслуговування автотранспорту, що актуалізує подальші дослідження.

Список літератури:

1. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту, наказ МТУ № 102 від 30.03.98 м.Київ.
2. ДСТУ 3650-97. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. м. Київ.
3. Бажинов А. В. Прогноз та управління в системі ТО та ремонту автомобілів. *Вісник ХДАДТУ*. Харків, 2000. №. 12–13. С. 34–37.
4. Іванова О. В., Коваленко О. М. Моделювання процесів технічного обслуговування і ремонту в системах транспорту. *Наукові праці*, 2020. Том 5, № 3, С. 45–56.
5. Ковальчук В. О. Стратегії технічного обслуговування в автотранспортних підприємствах. Львів: ЛНУ, 2012. – 350 с.
6. Подрігало М. А. Кухтов В. Г., Полянський А. С. Забезпечення надійності автотракторної техніки адаптивними методами технічного обслуговування та ремонту. *Автомобільний транспорт*. Х.: ХДАДТУ, 2000. Вип. 4. С. 49–51.
7. Полянський О. С. Нестеренко О. А., Молодан А. А., Степанов О. В. Принципи та структура адаптивної системи технічного обслуговування та ремонту автотракторної техніки. *Вісник ХНТУСГ*. 36. наук. тр. ХНТУСГ, 2005. Вип. 40. С. 110–117.
8. Степанов О. В. Дослідження оптимальної періодичності ремонтів автосамоскидів КраЗ, що працюють на породному відвалі. *Автомобільний транспорт*. 36. наук. тр. ХНАДУ, 2005. № 17.
9. О. В. Степанов, Т. В. Волобуєва. Адаптивна система технічного обслуговування автотранспорту. *Автомобільний транспорт та інфраструктура*. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (18–20 квітня 2024 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. 266 с. (С. 129–132).
10. Степанов О. В., Волобуєва Т. В., Лемішко Д. С. Оптимізація оцінки технічного стану агрегатів. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії* : зб. тез та доп. міжнар. конф., 11–12 берез.

2024 р. / М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків : ФОП Бровін О.В., 2024. С. 253–256.

11. Subhash Mathew. Optimal inspection frequency. International Journal of Quality & Reliability Management. Vol. 21. No. 7, 2004. pp. 763–771.

Stepanov O.V., Volobuyeva T.V., Zhdanov O.O. OPTIMAL FREQUENCY OF REPLACEMENT OF FREIGHT VEHICLE UNITS WHEN REACHING A GIVEN OPERATING TIME

The article is devoted to the concept of the optimal frequency of replacement of units of private vehicles when a given purpose is reached. It is shown that the current system of scheduled preventive maintenance of motor vehicles is based on repair cycles developed in accordance with the industry methodology for developing standards for the need for spare parts for vehicles for repair and maintenance needs. However, the repair cycles of freight vehicles obtained using various optimization criteria do not take into account their technical condition, which changes during operation. It is determined that the developed repair plans for technological freight vehicles often do not meet the actual need for spare parts, labor resources and the frequency of scheduled repairs. This leads to an increase in emergency downtime of freight vehicles and a sharp increase in operating costs. The study proves that, the reason for the replacement of units of technological freight vehicles is the increased wear rate caused by air dust, violation of maintenance regimes, operating rules or the use of low-quality oil. In order to maintain reliability indicators, taking into account the operating conditions, organization of repairs, planning methods and methods for establishing the frequency and scope of repair and maintenance work that ensure the maximum effect of their use, it is necessary to apply repair and maintenance in accordance with the current technical condition of freight vehicles. It is concluded that the proposed concept of technology for repair and preventive maintenance of freight vehicles provides for preventive replacement of elements when they reach a given operating time and allows for emergency replacements in the event of failures.

Key words: freight vehicle, technical condition, unit, repair cycles, repair and preventive maintenance.

Степанов О.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Кувшинов А.О.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

АДАПТИВНА СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ

Стаття присвячена розгляду адаптивної системи технічного обслуговування вантажного автотранспорту. З'ясовано, що наявні номінальні значення вихідних параметрів характеризують вантажний автотранспорт у стандартних умовах експлуатації. Але в реальних умовах на характеристики автотранспорту впливає тривалість і умови експлуатації. Ступінь цього впливу залежить від надійності, що відображає зміну в часі вихідних параметрів конструкції автотранспорту. Разом з тим різноманітність експлуатаційних і технологічних умов висуває специфічні вимоги до автотранспорту через їх надійність та корегування нормативів технічного обслуговування і ремонту. Тобто своєчасний перехід на прогресивну систему забезпечення працездатного стану автотранспорту в конкретних умовах експлуатації дозволить підвищити рівень його надійності та ефективність використання. У ході дослідження доведено, що при розробці різних методів прогнозування надійності вантажного автотранспорту необхідно проводити технічні впливи, призначати їх обсяг і терміни проведення залежно від фактичного технічного стану автотранспорту з урахуванням умов експлуатації. Встановлено, що своєчасний перехід на прогресивну адаптивну систему забезпечення працездатного стану автотранспорту в конкретних умовах експлуатації дозволить підвищити рівень його надійності та ефективність використання. У запропонованій адаптивній системі технічного обслуговування і ремонту принципи управління технічною експлуатацією автотранспорту відрізняється від чинної системи планово-попереджувальних ремонтів. Зроблено висновок, що завдяки своєчасній технічній діагностиці, високоякісний ремонт на основі оптимальної групової заміни елементів у вузлах забезпечує підтримку основних експлуатаційних параметрів автотранспорту. Тобто конструктивні особливості автотранспорту та технологічні умови їх експлуатації визначають адаптацію і, отже, ефективність роботи автотранспорту в експлуатаційних умовах.

Ключові слова: вантажний автотранспорт, адаптивна система, технічне обслуговування, умови експлуатації, надійність.

Постановка проблеми. Нормативна та технічна література вказує на номінальні значення вихідних параметрів, що характеризують вантажний автотранспорт (надалі – автотранспорт) у стандартних умовах експлуатації [1–5]. Але в реальних умовах на характеристики автотранспорту впливає тривалість і умови експлуатації. Ступінь цього впливу залежить від надійності, що відображає зміну в часі вихідних параметрів конструкції автотранспорту [6]. Слід зауважити, що режими технічного обслуговування і ремонту (ТОР) для автотранспорту в системі планово-попереджувальних ремонтів (ППР) не змінювалися протягом багатьох років. Крім того, за останній час були розроблені нові технології ремонту, олії та мастильні матеріали, які значно перевершують старі аналоги за якістю та характеристиками.

Важливо зазначити, що чим вища надійність, тим довше зберігаються початкові параметри на

оптимальному рівні, що сприяє кращій адаптації автотранспорту до конкретних умов експлуатації. При цьому застосування сучасних систем підтримки працездатності автотранспорту в умовах експлуатації дозволить підвищити його надійність та ефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням основних принципів забезпечення працездатності транспортних засобів та дослідження їх надійності присвячені роботи В. Я. Аніловича, О. В. Бажинова, В. М. Варфоломєєва, Є. С. Венцеля, І. М. Величина, Є. М. Гецовича, М. Я. Говорущенка, О. С. Гринченка, І. Е. Дюміна, І. В. Крагельського, О. П. Кравченка, Є. С. Кузнецова, Р. В. Кугеля, В. Г. Кухтова, А. Т. Лебедева, В. М. Міхліна, В. В. Нічке, О. С. Пронікова, Л. В. Погорелова, М. А. Подригало, О. С. Полянського, А. А. Старосельського, А. М. Туренка, В. Н. Ткачова та багатьох інших авторів. Науковці

зазначають, що різноманіття експлуатаційних і технологічних умов вимагає специфічних вимог до автотранспорту, зокрема щодо його надійності та коригування нормативів ТОР. У цьому контексті система ППР включає широкий спектр заходів для забезпечення надійності автотранспорту. Крім того, встановлено, що технічний стан автотранспорту змінюється в процесі експлуатації і з ростом пробігу поступово погіршується.

Під час дослідження роботи автотранспорту, зокрема технологічних автосамоскидів КрАЗ (надалі – автосамоскиди), на породних відвалах вугільних шахт Донецької області були виявлені недоліки в організації поточного ППР [9]. З'ясувалося, що основними факторами, які знижують надійність автосамоскидів, є знос таких елементів, як з'єднані деталі коробки передач та роздавальної коробки, гумотехнічні вироби, гальмівні накладки, барабани, розтискні кулаки та їх втулки, наконечники кермових тяг, циліндро-поршнева група двигуна, елементи підвіски, балансиру, надрамника тощо (див. рис. 1).

Огляд наукових джерел [6–10] виявив, що при розробці методів прогнозування надійності автотранспорту необхідно впроваджувати адаптивну систему технічного обслуговування, яка визначається на основі фактичного технічного стану транспортного засобу з урахуванням умов його експлуатації.

Постановка завдання. Метою статті є розгляд адаптивної системи технічного обслуговування і ремонту вантажного автотранспорту.

Виклад основного матеріалу. Для автотранспорту загального користування впроваджено систему ППР, яка забезпечує підтримку автотранспорту в технічно справному стані. Ключовим фактором для підвищення ефективності автотранспорту є організовані роботи з ТОР [1–6].

У запропонованій адаптивній системі ТОР принципи управління технічним обслуговуванням автотранспорту (на прикладі роботи автосамоскида) відрізняються від чинної системи ППР. Основні принципи цієї системи включають: забезпечення безперебійної роботи автосамоскида; безпека та економічність експлуатації; максимальне використання технічних можливостей автосамоскида; досягнення заданого рівня надійності; системний підхід до моніторингу технічного стану; оптимізацію матеріальних і трудових витрат; прийняття рішень з урахуванням конкретних умов експлуатації. При цьому одним з найважливіших засобів підвищення ефективності використання автосамоскида є своєчасна технічна діагностика.

Важливим аспектом є високоякісний ремонт, який базується на оптимальній груповій заміні елементів у вузлах, що забезпечують підтримку основних експлуатаційних параметрів автосамоскида. Тобто конструктивні характеристики автосамоскида та умови його експлуатації визначають адаптацію і, відповідно, ефективність його роботи в певних умовах.

Аналіз роботи автосамоскидів на породних відвалах дозволив виявити недоліки в організації чинної системи ППР [9]. З'ясувалося, що недо-

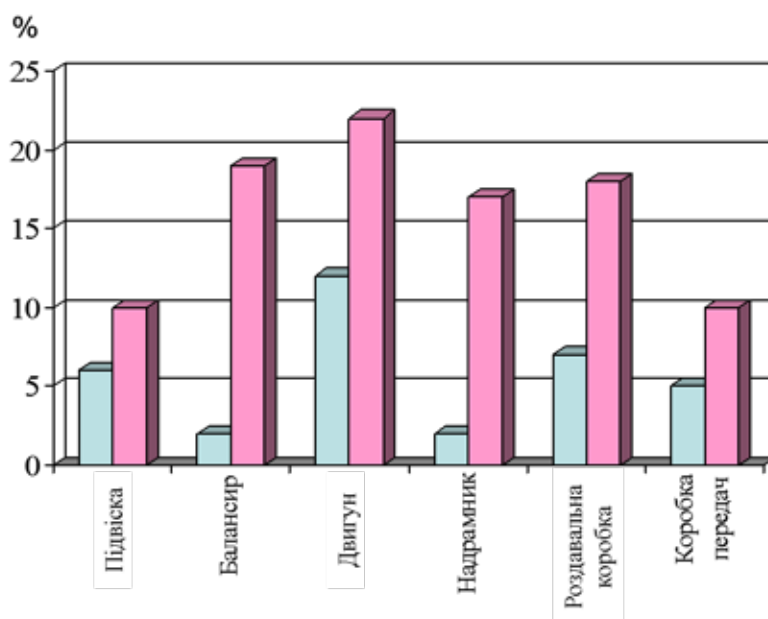


Рис. 1. Систематичні відмови в автосамоскидах при роботі на породних відвалах:
 ■ – звичайні умови експлуатації, ■ – робота автосамоскида на породному відвалі

статньо уваги приділяється систематичним перевантаженням вантажних платформ автосамоскидів гірською породою та впливу агресивного середовища (запилення) на породних відвалах, що призводить до частих відмов (рис. 1).

Згідно з Правилами технічної експлуатації технологічного автотранспорту на відкритих роботах та чинними вимогами ТОР [1, 2, 4], вузли й агрегати автосамоскида об'єднані в ремонтні групи, а їх ремонт і обслуговування здійснюються після досягнення певного напрацювання, без врахування умов експлуатації. Це означає, що поточна система ТОР автосамоскидів у гірничодобувній

галузі не враховує специфіку експлуатаційних умов, такі як режими навантаження, запиленість, кліматичні фактори та інші умови, що негативно впливає на надійність автосамоскидів.

У зв'язку з цим пропонується адаптована система ТОР, яка включає організаційні та технічні заходи для моніторингу, обслуговування та ремонту автосамоскидів, ґрунтуючись на вивченні зносу деталей, вузлів і агрегатів кожного автосамоскида.

Міжремонтні терміни визначаються через моніторинг початкового технічного стану автосамоскида в конкретних умовах експлуатації.

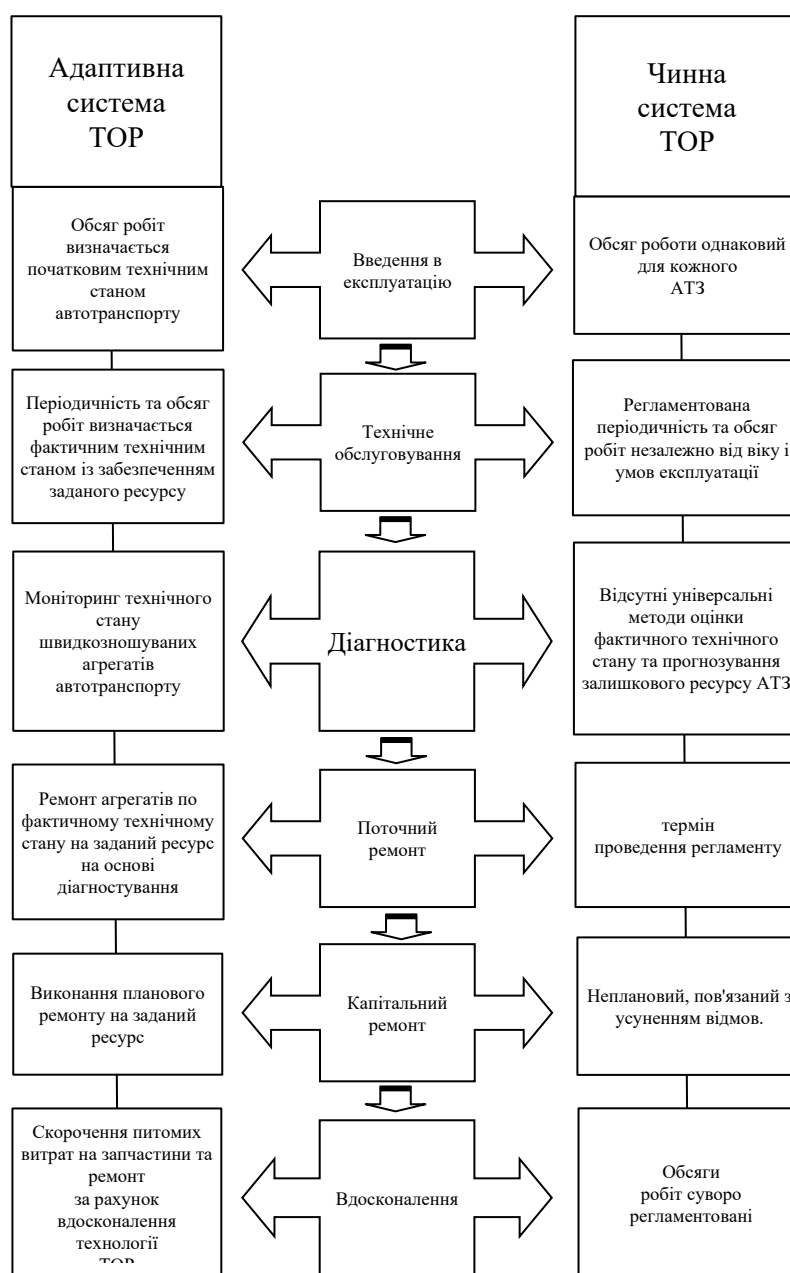


Рис. 2. Порівняльний аналіз чинної та адаптивної систем ТОР автосамоскида

Пропонована адаптивна система ТОР враховує основні ремонтні нормативи, такі як тривалість ремонтного циклу, міжремонтний період та структуру ремонтного циклу тощо. Порівняльний аналіз чинної системи ТОР і адаптивної системи ТОР представлений на рис. 2.

Аналіз умов експлуатації автосамоскида дало змогу встановити залежність напрацювання деталей від відмов. Визначення законів розподілу напрацювання на відмову окремих деталей і вузлів автосамоскида дозволяє по-новому організувати систему ТОР. Дослідженням виявлено, що такий підхід може бути економічно і технічно обґрунтованим лише за умови можливості прогнозування відмов деталей не лише за тривалістю інтервалу τ , а й за значенням напрацювання T , на якому цей інтервал базується (рис. 3).

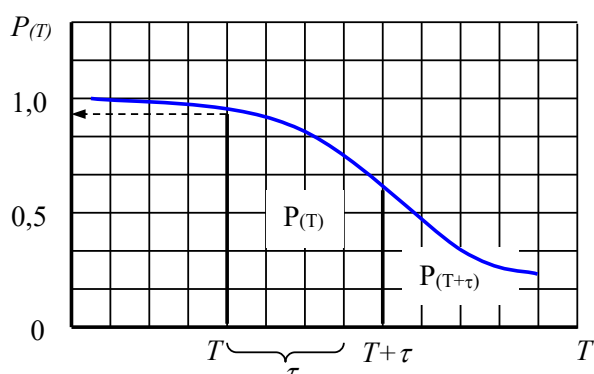


Рис. 3. Визначення ймовірності безвідмовної роботи на інтервалі τ

Деталі, вузли та агрегати автосамоскида, відмови яких залежать від рівня напрацювання (зношування, старіння чи накопичення втоми), можуть бути відновлені. Однак при аналізі їх надійності доцільно розглядати їх як невідновлювані елементи, оскільки в разі відмови деталі (вузла) вона замінюється на іншу, придатну для експлуатації. Водночас деталь або вузол, що вийшли з ладу, направляються на ремонт.

Для виведення загальної формули прогнозування відмов в інтервалі τ з напрацювання T припустимо, що до моменту T відмови розглянутої деталі не було. Тоді за теоремою множення ймовірностей справедлива рівність:

$$P_{(T+\tau)} = P_{(T)} P_{(\tau)}, \quad (1)$$

де $P_{(T)}$ і $P_{(\tau)}$ – ймовірність того, що в інтервалі відповідно від 0 до T та від T до $T + \tau$ відмови не буде.

З (1) отримуємо:

$$P_{(\tau)} = \frac{P_{(T+\tau)}}{P_{(T)}}. \quad (2)$$

Оскільки події появи відмови та не появи відмови в інтервалі τ представляють повну сукупність несумісних подій, сума ймовірностей появи яких дорівнює одиниці, можна записати:

$$\bar{P}_{(\tau)} = 1 - \frac{P_{(T+\tau)}}{P_{(T)}}, \quad (3)$$

де $\bar{P}_{(\tau)}$ – ймовірність виникнення відмови в інтервалі τ .

Отримана формула дозволяє прогнозувати ймовірність появи відмов в інтервалі за попереднім до цього інтервалу напрацюванням T .

На даний час широко використовуються різні коефіцієнти, що коригують нормативи для ТОР автотранспорту. Однак ці коефіцієнти встановлені однаковими для всіх типів автотранспорту, не враховуючи при цьому адаптацію технологічного автотранспорту до специфічних умов експлуатації.

Для того, щоб кількісно оцінити рівень адаптації до конкретних умов, необхідно розглядати автотранспорт як систему, основними параметрами якого є експлуатаційні характеристики конструкції та показники ефективності його використання. Модель формування якості автотранспорту, яка основана на групах властивостей, ґрунтується на тому, що вихідні параметри автотранспорту залежать від номінальних характеристик його конструкції. Вони являють собою початкові дані для нового автотранспорту в стандартних умовах експлуатації, а також адаптацію конструкції автотранспорту до нових експлуатаційних умов.

Позначимо який-небудь параметр автотранспорту (наприклад, інтенсивність зношування) буквою U . Величина U залежить від умов експлуатації. Розглянемо зміну одного з факторів умов експлуатації. Позначимо цей фактор буквою X .

Так, при роботі технологічного автотранспорту адаптацію U до зміни X пропонується характеризувати параметром «коефіцієнт адаптації» – K_a . Цей показник дорівнює одиниці ($K_a = 1$), коли величина U залишається постійною при зміні фактора X , тобто настає повна адаптація.

При погіршенні адаптації значення цього показника стає менше одиниці. Параметр «коефіцієнт адаптації» зручний і змінюється в межах від 1 до 0 ($0 \leq K_a \leq 1$).

Додатково U є чутливим до зміни X і в цілому, кількісно, його пропонується характеризувати параметром «коефіцієнт чутливості до адаптації K_u ». Якщо коефіцієнт адаптації дорівнює одиниці ($K_a = 1$), це свідчить про повну адаптації та відсутність чутливості, тобто $K_u = 0$. У міру погіршення адаптації параметр чутливості зростає.

Побудова кількісних характеристик адаптації (рис. 4) засновано на математичній моделі: $Y = Y_0 - 3(X - X_0)^2$.

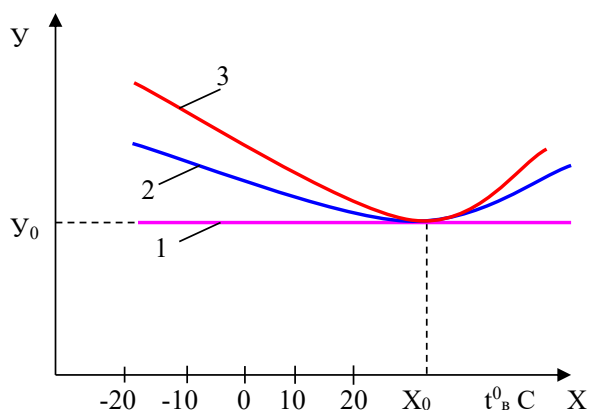


Рис. 4. Графік інтенсивності зношування агрегатів автотранспорту залежно від температури навколишнього середовища, $X = t_v^0$

Математична модель відображає таку типову ситуацію, коли вихідний параметр Y обмежений знизу, а оптимальним є його найменше значення Y_0 . При цьому оптимальне значення фактора X_0 віддалене від його крайніх можливих значень. Такою моделлю можна описати інтенсивність зношування агрегатів автотранспорту.

Можливий випадок, коли вихідний параметр Y залишається постійним при зміні фактора X (лінія 1), наприклад: маса самого автомобіля постійна при зміні температури навколишнього повітря. Однак, якщо за параметр Y прийняти безвідмовність автотранспорту, то в реальних умовах експлуатації цей параметр нестабільний і залежить від зміни температури навколишнього повітря (наприклад: різні пори року). Інтенсивність зміни величин Y для одних умов експлуатації буде більшою (лінія 3), ніж для інших (лінія 2), тобто ця інтенсивність може служити кількісною характеристикою адаптації автотранспорту до зміни фактора X (рис. 4).

Таким чином, адаптивна система ТОР – це сукупність організаційних, технічних, технологічних та інших заходів щодо забезпечення працездатного стану автотранспорту та підтримки заданої надійності протягом терміну експлуатації [8].

Якщо розглядати приватні фактори, що впливають на рівень технічної експлуатації автотранспорту, їх можна поділити на три категорії.

Категорія 1 – фактори, оптимізація яких потребує значних матеріальних витрат на виробництво. Сюди належать: стан ремонтних баз і баз, що

обслуговують, а також наявність і стан складів для зберігання агрегатів автотранспорту.

Категорія 2 – фактори, оптимізація яких не вимагає матеріальних витрат і залежить лише від рівня організації технічного обслуговування. До них відносяться: виконання операцій ТОР, дотримання термінів їх проведення, кваліфікація персоналу, що здійснює ТОР, дотримання вимог до мастил, палива, клас водіїв та зберігання автотранспорту.

Категорія 3 – фактори, оптимізація яких пов'язана з рівнем організації служби експлуатації, ремонту та обслуговування автотранспорту і вимагає мінімальних матеріальних витрат. Сюди входять: використання відповідного обладнання, наявність нормативно-технічної документації, вибір запасних частин для поточного ремонту, застосування діагностики та контроль якості ремонту.

Для підвищення рівня технічної експлуатації автотранспорту слід насамперед зосередитись на факторах другої й третьої категорій, оскільки вони не потребують великих фінансових вкладень і можуть бути оптимізовані через організаційні заходи.

У процесі експлуатації автотранспорту постає питання вибору найбільш підходящого автотранспорту для конкретних умов експлуатації. Для розв'язання цієї задачі необхідно визначити критерії оцінки безвідмовної роботи вузлів та агрегатів автотранспорту, які можна поділити на три групи: технічні, економічні та техніко-економічні.

Технічні критерії оцінки безвідмовної роботи включають такі показники, як ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, параметри потоку відмов і середнє напруження на відмову. Вони дають точну інформацію про технічний стан та рівень експлуатації транспорту.

Економічні критерії базуються на факторах, таких як втрати від простоїв транспорту через відмови, витрати на усунення відмов та втрати від зниження якості виконуваних робіт. Ці критерії дозволяють здійснити економічне обґрунтування вибору автотранспорту для певних умов експлуатації.

Техніко-економічні критерії оцінки безвідмовної роботи автотранспорту базуються на узагальнених показниках, одним з яких є витрати на експлуатацію автотранспорту, що віднесені до одиниці виконаних робіт, які виражені у фізичних величинах або вартісних показниках.

Висновки. Адаптивна система ТОР забезпечує значне підвищення ефективності управління тех-

нічним обслуговуванням автотранспорту порівняно з чинною (традиційною) системою ППР. Ця система ґрунтується на принципах безперебійної роботи, безпеки, економічної ефективності, максимального використання технічних можливостей автотранспорту та досягнення високого рівня їх надійності.

Одним з основних аспектів функціонування адаптивної системи ТОР є впровадження інноваційних підходів до обслуговування, що дозволяє не лише своєчасно виявляти та усувати неполадки, але й запобігати їх виникненню. Важливу

роль у цьому відіграє високоякісний ремонт, який є критичним фактором для ефективної експлуатації автотранспорту. Зокрема, це стосується оптимального групового заміщення елементів у вузлах, які підтримують основні експлуатаційні параметри автотранспорту.

Таким чином, адаптивна система ТОР дозволяє значно покращити технічний стан автотранспорту, знижує витрати на обслуговування та підвищує загальну ефективність використання автотранспорту, що є перспективною тематикою для подальших досліджень.

Список літератури:

1. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту, наказ МТУ № 102 від 30.03.98, м.Київ.
2. Про затвердження Вимог до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу, методів такої перевірки. Наказ Міністерства Інфраструктури України від 26.11.2012 № 710
3. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення.
4. ДСТУ 3650-97. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів.
5. ДСТУ 4295-2004. Автомобільний транспорт. Загальні технічні вимоги до автотранспортних засобів.
6. Ковальчук, В. О. Стратегії технічного обслуговування в автотранспортних підприємствах. Львів: ЛНУ, 2012. 350 с.
7. Подригало М. А. Кухтов В. Г., Полянський А. С. Забезпечення надійності автотракторної техніки адаптивними методами технічного обслуговування та ремонту. *Автомобільний транспорт*. Х.: ХДАДТУ, 2000. Вип. 4. С. 49–51.
8. Полянський О. С. Нестеренко О. А., Молодан А. А., Степанов О. В. Принципи та структура адаптивної системи технічного обслуговування та ремонту автотракторної техніки. *Вісник ХНТУСГ*. 36. наук. тр. ХНТУСГ, 2005. Вип. 40. С. 110–117.
9. Степанов О. В. Дослідження оптимальної періодичності ремонтів автосамоскидів КрАЗ, що працюють на породному відвалі. *Автомобільний транспорт*. 36. наук. тр. ХНАДУ, 2005. № 17.
10. Степанов О. В., Волобуєва Т. В. Адаптивна система технічного обслуговування автотранспорту. *Автомобільний транспорт та інфраструктура*. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (18–20 квітня 2024 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 129–132.

Stepanov O.V., Kuvshinov A.O. ADAPTIVE SYSTEM OF FREIGHT VEHICLES MAINTENANCE

The article is devoted to the concept of optimal frequency of replacement of truck units upon reaching a given operating time. It was found that the existing nominal values of the output parameters characterize freight vehicles under standard operating conditions. But in real life, the characteristics of vehicles are affected by the duration and conditions of operation. The degree of this influence depends on reliability, which reflects the change in the initial parameters of the vehicle design over time. At the same time, a variety of operating and technological conditions imposes specific requirements on vehicles in terms of their reliability and adjustments to maintenance and repair standards. That is, a timely transition to a progressive system of ensuring the operable condition of vehicles in specific operating conditions will increase the level of their reliability and efficiency of use. The study proves that when developing various methods for predicting the reliability of freight vehicles, it is necessary to carry out technical interventions, to assign their scope and timing depending on the actual technical condition of the vehicle, taking into account the operating conditions. It has been established that a timely transition to a progressive adaptive system for ensuring the serviceable condition of vehicles under specific operating conditions will increase the level of their reliability and efficiency of use. In the proposed adaptive system of maintenance and repair, the principles of managing the technical operation of vehicles differ from the current system of scheduled preventive maintenance. It is concluded that due to timely technical diagnostics, high-quality repairs based on the optimal group replacement of elements in the units ensure the maintenance of the main operational parameters of vehicles. That is, the design features of motor vehicles and the technological conditions of their operation determine the adaptation and, consequently, the efficiency of motor vehicles in operating conditions.

Key words: freight vehicle, adaptive system, maintenance, operating conditions, reliability.

Трофименко І.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Войченко Т.О.

Державний університет інфраструктури та технологій

Пліта Л.Л.

Державний університет інфраструктури та технологій

Федунов В.М.

Державний університет інфраструктури та технологій

РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЕВРИСТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ В ЗАДАЧАХ БАГАТОАГЕНТНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ

Метою статті є розробка пропозицій щодо застосування метаевристичних алгоритмів в задачах багатоагентної маршрутизації морських перевезень вантажів у контексті синтезу алгоритмів кластеризації для задачі мультиагентного комівояжера. Поставлена мета досягається шляхом дослідження використання еволюційних багатоагентних алгоритмів для розв'язання задач, таких як багатоагентний комівояжерний маршрут, та шляхом аналізу їх ефективності та можливості оптимізації. Для розподілу вершин між подорожуючими агентами застосовується кластеризація з використанням алгоритму максимального зрізу. Досліджено перспективи методу кластеризації (зокрема, заснованого на побудові максимальних перетинів) в поєднанні з метаевристикою. Якщо мережу було попередньо оброблено з урахуванням її структури, тобто виявлено поділ мережевого графа на підграфи (кластеризація), можна розв'язати задачу побудови маршрутів комівояжерів на мережі меншої розмірності. Гібридні алгоритми можуть оптимізувати основні алгоритми, як це виявлено в результаті дослідження алгоритмів на відомих графах. Визначено, що у прикладних задачах маршрутизації, таких як задача комівояжера для морських перевезень вантажів, оптимальніше поєднувати кілька підходів, включаючи кластеризацію та проектування мережі на більш просту структуру з поліноміальною складністю рішення. Найбільш суттєвим результатом є структура процедури синтезу алгоритмів кластеризації та розв'язання задачі комівояжера для морських перевезень вантажів. Цей підхід синтезу алгоритмів можна використовувати не лише для задачі комівояжера, оскільки цільова функція може бути використана для будь-якої задачі дискретної оптимізації на графах, де потрібна кластеризація та можливе формулювання умови збіжності для алгоритму синтезу. Дослідження демонструє потенціал для значного підвищення ефективності морських перевезень, що може призвести до оптимізації логістичних процесів, зниження витрат та покращення загальної продуктивності у галузі морських вантажоперевезень.

Ключові слова: морські перевезення вантажів, багатоагентна маршрутизація, задача комівояжера, кластеризація, оптимальний маршрут.

Постановка проблеми. Задача комівояжера, відома як Traveling Salesman Problem (TSP), має значну історію досліджень теоретичних аспектів, алгоритмічних розробок та практичних застосувань, в тому числі і в галузі морських перевезень вантажів. Оскільки TSP є NP-складною у сильному сенсі, вона використовується як тестова задача для нових ідей вирішення NP-складних комбінаторних оптимізаційних задач. З іншого

боку, TSP входить до моделі маршрутизації разом з іншими дискретними задачами оптимізації. Задача комівояжера пов'язана з класичними результатами теорії графів, де розв'язання екстремальних задач є надзвичайно складним завданням. Сучасні дослідження націлені на вирішення задач багатоагентної маршрутизації (кратні TSP або mTSP) на складних мережах, які мають великі розмірності та складну структуру.

Ці задачі належать до класу дискретних оптимізаційних задач.

Таким чином, задачі TSP та mTSP масового масштабу є NP-повними, але існують окремі екземпляри цих задач, які можуть бути розв'язані швидко за допомогою точних, евристичних або комбінованих алгоритмів. Попереднє розпізнавання складності задач перед числовими обчисленнями є майже неможливим. Однак, якщо задача mTSP є моделлю реальної прикладної задачі, такої як маршрутизація морських перевезень вантажів, її можна переформулювати та виразити у вигляді поліноміально розв'язуваних задач TSP або mTSP, знявши деякі обмеження. Для цього необхідно створити базу даних поліноміально розв'язуваних задач та розробити алгоритми розпізнавання або формування вхідних даних у формі, що дозволяє їх розв'язувати поліномами. Важливим аспектом є зменшення розмірності етапу перетворення з експоненціальною складністю, що можна досягти, наприклад, за допомогою мережевої кластеризації при розв'язанні задач маршрутизації морських перевезень вантажів. Такий підхід дозволяє окремо обробляти хороші та погані екземпляри задач, а також фіксувати обмеження, які суттєво погіршують їх розв'язуваність.

Таким чином, задача mTSP формулюється як узагальнення задачі TSP для багатьох комівояжерів. Аналіз публікацій на цю тему підтверджує необхідність розробки приблизних алгоритмів вибору оптимальних маршрутів в складних мережах – на великих графіках, таких, наприклад, як в задачах маршрутизації морських перевезень вантажів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рішення mTSP з використанням інформації до TSP отримано у роботах [1] і [2]. Точні підходи до рішення mTSP засновані або на перетворенні mTSP в TSP або на ослабленні деяких обмежень задачі. Перша спроба розв'язання mTSP без перетворення в стандартний TSP була запропонована у роботі [3], в якій запропонували два точних алгоритму прямий і зворотний. У роботі [4] запропоновано алгоритм відгалуження і кордонів, що використовує лагранжівську релаксацію і субградієнтний алгоритм для розв'язання подвійної лагранжівської задачі, яка моделюється як асиметрична mTSP. Алгоритм може бути застосований як до симетричних, так і до асиметричних mTSP. У роботі [5] розроблено перший алгоритм для розв'язання великомасштабних mTSP. Вони використовували метод відгалужень і кордонів, вста-

новлюючи нижні межі за допомогою лагранжівської релаксації.

Ефективним підходом для розв'язання відповідних задач є застосування евристичних підходів. Найбільш поширеним розв'язання mTSP є генетичний алгоритм (GA). Наприклад, у статті [6] розглядається mTSP, що мінімізує суму відстаней всіх маршрутів. Модель містить у собі кілька складів, закритий шлях і вимогу до мінімальної кількості міст, які повинен відвідати кожен агент. Для розв'язання поставлених задач пропонуються два GA. Перший використовується в поєднанні з вибором рулетки і елітним вибором, в якому пропонується чотири нових види мутаційної хірургії. Другий пов'язує селекцію і мутацію воедино. Стаття [7] пропонує новий ефективний GA з локальними операторами для розв'язання mTSP в розумні терміни для реальних застосувань. Два нових локальних оператора покликані прискорити зближення процесу пошуку і підвищити якість рішення. У роботі [8] розглянуто, як алгоритм мурашиної колонії (АМК) може бути застосований до безперервної оптимізації, і обговорено нову тенденцію в АМК, яка використовує гібридний метод оптимізації для вирішення mTSP. Автори роботи [9] запропонували інший підхід, який можна застосувати до розв'язання mTSP з обмеженими функціями. Автори уникнули застою і передчасної конвергенції, використовуючи стратегію розподілу вихідних мурах і динамічного евристичного оновлення параметрів на основі ентропії. Також в літературі пропонується використання гібридних алгоритмів на основі GA, наприклад у роботі [10]. У статті [11] міста групуються в кластери, де кожен кластер являє собою сукупність суміжних міст, а потім використовується один з відомих підходів до оптимізації для пошуку оптимального маршруту для кожного кластера. Автори застосовують алгоритм мурашиних колоній, а також GA для послідовного і паралельного програмування.

Таким чином, існує значна кількість підходів до розв'язання багатоагентних задач маршрутизації. Аналіз підтверджує доцільність вибору алгоритмів, що використовуються у даній розв'язання для вирішення задач багатоагентної маршрутизації морських перевезень вантажів.

Постановка завдання. Метою статті є розробка пропозицій щодо застосування мета-евристичних алгоритмів в задачах багатоагентної маршрутизації морських перевезень вантажів у контексті синтезу алгоритмів кластеризації для задачі мультиагентного комівояжера.

Виклад основного матеріалу. У статті розглянуто задачу кластеризації, яка узгоджується з основним завданням побудови маршрутів у складній мережі, наприклад, при розв'язанні задач маршрутизації морських перевезень вантажів, що дозволяє синтезувати алгоритми ієрархічних рішень, що значно скорочують час побудови прийнятного наближеного рішення.

Будь-яка складна мережа являє собою граф великої розмірності, що складається з вершин і дуг, яким відповідають множини кількісних (метричних) і якісних характеристик, ознак. Ви можете виявити, що для деяких ділянок мережі (кластерів) обрані властивості не сильно змінюються, а зазнають змін на кордонах кластера. У зв'язку з цим метою кластеризації є спрощення вихідної складної мережі, виявлення в ній характерних структур для подальшого аналізу кластерів і міжкластерних зв'язків, а також побудова наближених (раціональних, в реальному часі, швидких) рішень відповідних задач дискретної оптимізації на графах.

Результатом кластеризації є сукупність кластерів, які повністю охоплюють мережевий граф, або межі кластерів, визначені дугами перерізів між кластерами. Залежно від початкових формулювань завдань дискретної оптимізації в мережі виникає множина різних мультиагентних задач на кластерах і міжкластерних комунікаціях.

Для даної (частково або повністю) складної мережі необхідно знайти, що відповідає задачі маршрутизації, компоновку мережі на певну кількість кластерів, що забезпечує високу точність і швидкість розв'язання відповідних екстремальних задач на графах.

Відповідним способом ефективного розв'язання задач маршрутизації у складно структурованих мережах є використання математичних моделей, що описують колективну поведінку децентралізованої самоорганізованої системи, що складається з множини агентів, які локально взаємодіють один з одним і з навколишнім середовищем для досягнення глобальної мети. У природі прикладами таких систем є, наприклад, мурашині колонії, рої бджіл. Кожен агент у системі функціонує автономно, використовуючи прості правила. При цьому алгоритм спільної поведінки всіх агентів дозволяє розв'язати таку задачу. Колективний інтелект розглядається як ефективна процедура оптимізації, яка характеризується масштабованістю, здатністю розв'язувати задачі незалежно від їх розмірності, гнучкістю, відсутністю жорсткої структури, простотою правил поведінки агентів.

При переході до математичних багатоагентних моделей колективного інтелекту вводяться так звані евристичні коефіцієнти, які є керуючими параметрами мультиагентних методів і алгоритмів. Значення цих параметрів залежить від того, наскільки ефективно буде розв'язана задача оптимізації. Параметри можуть приймати нескінченну кількість значень з діапазону. Тому виникає питання про їх вибір і необхідності проведення експериментальних досліджень за загальними модельними (еталонними) тестовими завданнями з бібліотек з метою з'ясування оптимальних значень коефіцієнтів і оцінки обчислювальної складності методів колективного інтелекту. Іншими словами, необхідно з'ясувати, наскільки точно такі методи можуть розв'язувати задачі дискретної оптимізації в порівнянні з відомими методами; яка оцінка їх обчислювальної складності, а також які оптимальні значення евристичних коефіцієнтів, що використовуються в методах, і як вони впливають на кінцевий результат.

З урахуванням цих підходів представимо результати розробки алгоритмів кластеризації, придатних для розв'язання задач багатьох коміво-яжерів і їх програмної реалізації.

Методи кластеризації можна умовно розділити на автоматичні та інтерактивні, що використовують апріорну інформацію, або універсальні, які не використовують апріорну інформацію (про компактність, однорідність тощо). До універсальної групи методів і алгоритмів належать алгоритм *K*-середніх; алгоритми, що використовують метричні характеристики; алгоритми побудови різних розділів тощо.

Алгоритм *K*-середніх передбачає швидкий кластерний аналіз шляхом виділення k кластерів, які розташовані на максимальній відстані один від одного. Кількість кластерів k вибирається інтуїтивно або на основі результатів експериментів. Ідея алгоритму полягає в тому, що центри кластерів відповідають локальним максимумам щільності розподілу даних. Основний алгоритм *K*-середніх передбачає випадковий або евристичний вибір k кластерних центрів, розміщення кожної вершини графа в кластері з найближчим центром до цієї вершини, після чого центри кластерів перераховуються знову, поки процес збіжності не стане збіжним. Алгоритм гарантовано зійдеться, але не обов'язково приведе до оптимального рішення, так як залежить від початкового набору кластерів і значення k . Обчислювальна складність алгоритму *K*-середніх дорівнює $O(nkt)$, де

n – розмірність мережі, k – кількість кластерів, а t – кількість ітерацій, які потрібні алгоритмом для приведення кластерів у стабільний стан. До недоліків алгоритму можна віднести його чутливість до локальних змін в мережі (заборони, приписи, видалення елементів і т. д.), зниження швидкості роботи над великими обсягами даних, необхідність попередньо вказуватися кількість кластерів k .

Метод розрізу графа передбачає, що складна мережа представляється у вигляді зваженого ненаправленого графа. Між усіма вершинами будуються ребра, ваги яких показують міру подібності між вершинами в якійсь характеристиці. Вихідна графоподібна мережа розрізається на підграфи таким чином, щоб всередині підграфа ваги ребер значно відрізнялися від ваг ребер, що з'єднують підграфи. При цьому більшість алгоритмів для мінімальної ділянки графа мають трудомісткість $O(n)$, де n – загальна кількість вершин графа, але вимагають значних витрат пам'яті на зберігання матриць відстані. Тому їх складно застосувати до великовимірних мереж. Таким чином, проблема побудови алгоритмів кластеризації всієї мережі на основі кластеризації графів з прийнятними вимогами до пам'яті і продуктивності залишається актуальною.

Автоматичні методи і алгоритми не дозволяють знайти розв'язки довільних задач кластеризації з гарантованим результатом. Жоден з автоматичних методів і алгоритмів не ідеальний, в кращому випадку необхідно використовувати гібридну кластеризацію з різних комбінацій алгоритмів кластеризації, отриманих різними методами з різними параметрами. Алгоритми кластеризації зазвичай використовують точність і швидкість виконання в якості критерію порівняння. При цьому, для алгоритму кластеризації важлива складність оброблюваної мережі.

Краща точність кластеризації для складно структурованих мереж показана мурашиними алгоритмами, зокрема, для завдань обробки зображень. Дані цих досліджень показали значний вплив цільових функцій мурашиних алгоритмів на процес маркування мереж на кластерах, що дозволяє зробити висновок, що точність результату залежить від критеріїв використовуваної цільової функції. Аналіз алгоритмів еволюційних стратегій і генетичних алгоритмів показав, що даний підхід може бути використаний для обробки складних мереж, але результат має менший ступінь точності, а збіжність спостерігається в меншому відсотку випадків.

В якості задачі дискретної оптимізації візьмемо mTSP для $m=k$ агентів. Шуканий граф буде мати велику кількість вершин, тому один з евристичних алгоритмів буде використаний для розв'язання mTSP. Граф має повну зв'язність.

Розв'язуються дві задачі:

- 1) пошук оптимальних центрів кластерів;
- 2) формування оптимальних кластерів на основі критерію якості та розв'язання mTSP на кластерах.

При пошуку оптимальних кластерних центрів в якості вихідних даних визначимо кількість кластерів k . Припустимо, що оптимальність кластерного центру визначається двома параметрами: відстанню центру від інших центрів кластера; виконання «гіпотези компактності» для поточного кластера. Гіпотеза компактності в задачах кластеризації – це припущення про те, що подібні об'єкти набагато частіше лежать в одному кластері, ніж в різних, або, іншими словами, що кластери утворюють компактно локалізовані підмножини в об'єктному просторі. Це також означає, що межа між кластерами має досить просту форму.

Для розв'язання цієї задачі підійде алгоритм кластеризації К-середніх. У класичній реалізації алгоритму К-середніх, не потрібно вказувати потрібні центри, але досить знати кількість кластерів. Тому алгоритм здатний виділити оптимальні для нього кластери (підграфи). Розбивши граф на відповідні підграфи, можна взяти центр кожного підграфа, де центром є множина вершин, що мають мінімальний ексцентриситет. Відповідні вершини будуть оптимальними центрами для вихідного графа із заданою кількістю кластерів.

Про перевагу алгоритму К-середніх можна стверджувати тим, що даний алгоритм показує хороші результати кластеризації з різними критеріями якості. Алгоритм К-середніх також дотримується гіпотези компактності (форма кластерів сферична), оскільки використовує в якості критерію «подібності» відстань від вершини до центру кластера. Звідси і те, що центри кластерів будуть знаходитися якомога далі один від одного.

При пошуку оптимальних кластерів на основі критерію якості розглянемо TSP для k агентів. При цьому є вихідний графік, на якому виділені бази для кожного агента. Припустимо, що кожен отримує «приблизно» рівний підграф шуканого графа. Ставиться завдання: по визначеним центрам розбити графік на k кластерів G_i ; $i=1;k$ так, що всі агенти долають майже рівні відстані

$f_i(G_i) \approx f_{\text{середнє}}; i = \overline{1; k}$. Рівність кластерів по відношенню до TSP буде оцінюватися за таким критерієм якості:

$$\left| \max_{1 \leq i \leq k} f_i(G_i) - \min_{1 \leq i \leq k} f_i(G_i) \right| \leq \varepsilon. \quad (1)$$

В якості цільової функції вибирається значення пройденого шляху в TSP. Пошук найкоротшого шляху буде здійснюватися GA з елітним відбором, частково відповідним схрещуванням і з використанням жадібної евристики. Дана модифікація передбачає, що одна з хромосом GA в початковій популяції буде утворена жадібним алгоритмом (найближчий сусід). Така хромосома гарантує локальний оптимум, як і будь-яка жадібна евристика, і в той же час сприяє більш швидкому зближенню GA. Проблема «застою» в локальному оптимумі розв'язується тим, що при селекції половина хромосом з попереднього покоління залишиться в новому поколінні. Тому «слабкі» хромосоми можуть сприяти подальшому виходу з локального оптимуму.

Отримавши за генетичним алгоритмом початковий розбиття графа на k кластерів і значення цільової функції для кожного підграфа, оптимізуємо кластери, збалансувавши значення цільової функції для кожного кластера. Для цього нам потрібно перекинути вершини від найбільшої в перерахунку на значення цільової функції кластера $G_{\max}$ до найменшої – $G_{\min}$. Візьмемо найближчу вершину від $G_{\max}$ до $G_{\min}$ і присвоїмо їй його кластеру $G_{\max}$. У цьому випадку, якщо відстань між кластерами велике і / або між ними є інші кластери, то необхідно перенести вершину від $G_{\max}$ до $G_{\min}$ транзитом через всі кластери, що лежать між даними:

$$G_{\max} \rightarrow G_1 \rightarrow \dots \rightarrow G_m \rightarrow G_{\min}, \quad (2)$$

де G_i – кластери між $G_{\max}$ і $G_{\min}$, $i = \overline{1; m}$.

Припустимо, що кластер G_i лежить між G_n і G_m , якщо:

$$\begin{cases} \rho(G_n, G_i) < \rho(G_n, G_m), \\ \rho(G_i, G_m) < \rho(G_n, G_m), \end{cases} \quad (3)$$

де $\rho(x, y)$ – відстань від центру кластера x до центру кластера y . Після першого перемикавання вершин застосовуємо генетичний алгоритм для нового розділу. Такі кидки будемо виконувати до тих пір, поки не буде виконана умова зупинки (1). При цьому ε може бути довільно малим. Однак не варто брати занадто малі значення через те, що алгоритм може виділяти кластери з дуже великим поширенням вершин, що неприпустимо. Про-

грамна реалізація використовує динамічне збільшення ε (порогу), якщо алгоритм не зміг підібрати кластери на певну кількість ітерацій.

Даний алгоритм дозволяє виділити оптимальні підграфи зі збереженням заданих центрів для кожного кластера. Розбиття на розділи практично завжди буде неприйнятним, якщо є центри, які розташовані близько один до одного. У цьому випадку потрібно спочатку знайти оптимальні центри, а потім вже застосовувати цей алгоритм.

У найпростішому випадку під синтезом алгоритмів кластеризації і розв'язання TSP буде розумітися використання будь-якого алгоритму кластеризації для отримання початкового поділу вихідного графа на підграфи і будь-якого алгоритму розв'язання TSP. Структура процедури синтезу алгоритмів кластеризації та розв'язання mTSP для морських перевезень вантажів наведена на рис. 1.

В якості алгоритму кластеризації графів для початкового розбиття підійде будь-який алгоритм кластеризації з чіткою вершинною приналежністю. TSP також може бути розв'язаний будь-яким з відомих алгоритмів. Даний синтез алгоритмів може бути застосований не тільки до TSP, так як цільова функція може бути цільовою функцією будь-якої задачі дискретної оптимізації на графах, для якої необхідна кластеризація і для якої можна сформулювати умову збіжності алгоритму синтезу.

Висновки. У статті досліджено застосування еволюційних багатоагентних алгоритмів для розв'язання задач, таких як багатокомівоєжерів, та досліджено їх ефективність та можливість оптимізації. Для розподілу вершин між подорожуючими агентами використовується кластеризація з використанням алгоритму максимального зрізу. Різні алгоритми, такі як мураха, частинки рою, бджолиний, генетичний, багатоагентний жадібний алгоритм і їх комбінації, порівнюються.

Досліджено перспективи методу кластеризації (зокрема, заснованого на побудові максимальних перетинів) в поєднанні з метаевристикою. Якщо мережа була попередньо оброблена з урахуванням її структури, тобто виявлено поділ мережевого графа на підграфи (кластеризація), можна розв'язати задачу побудови маршрутів комівоєжерів на мережі меншої розмірності. Гібридні алгоритми можуть оптимізувати основні алгоритми, як це виявлено в результаті дослідження алгоритмів на відомих графах. Зокрема, мурашиний алгоритм потребує додаткової обробки, а алгоритм моделювання відпалу дозволяє отримати набли-

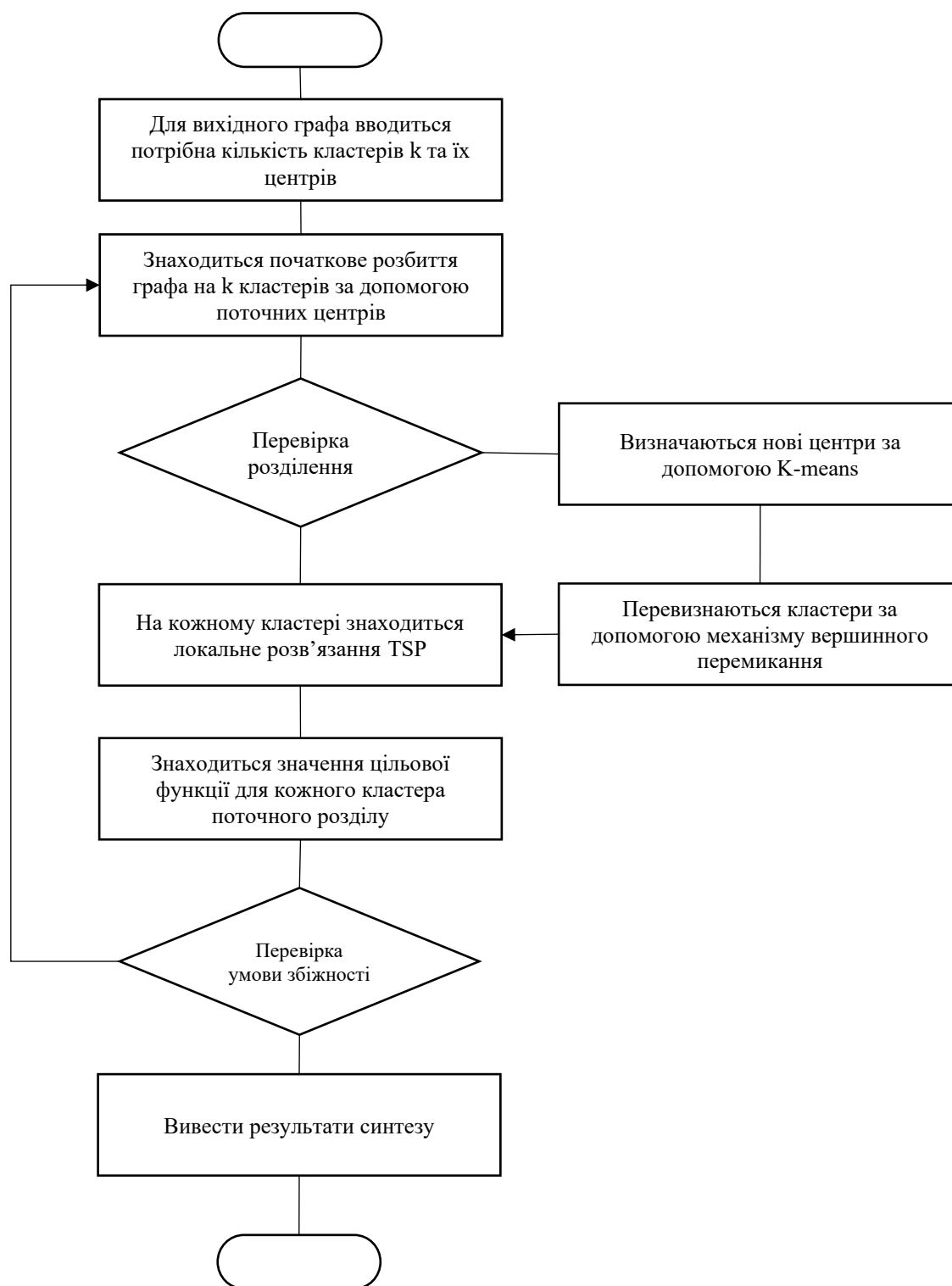


Рис. 1. Структура процедури синтезу алгоритмів кластеризації та розв'язання mTSP для морських перевезень вантажів для $m=k$ агентів

ження до оптимального рішення. У прикладних задачах маршрутизації, таких як mTSP морських перевезень вантажів, оптимальніше поєднувати кілька підходів, включаючи кластеризацію та проектування мережі на більш просту структуру з поліноміальною складністю рішення. Рекомен-

дується використовувати склади алгоритмів, такі як метаевристика, генетика та рій. Одним з раціональних алгоритмів поліноміальної жадібності є пошук попередніх маршрутів морських перевезень вантажів, застосування яких дозволяє уточнити рішення.

Список літератури:

1. Bellmore M. Hong S. Transformation of multisalesman problem to the standard traveling salesman problem. *Journal of the ACM*. 1974. Vol. 21. P. 500–504.
2. Bektas T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*. 2006. Vol. 34. P. 209–219.
3. Laporte G., Nobert Y. A. Cutting planes algorithm for the m-salesmen problem. *Journal of the Operational Research Society*. 1980. Vol. 31, No. 11. P. 1011023.
4. Ali A. I., Kennington J. L. The asymmetric m-traveling salesmen problem: a duality based branch-and-bound algorithm. *Discrete Applied Mathematics*. 1986. Vol. 13, To. 2. P. 259–276.
5. Gavish B., Srikanth K. An optimal solution method for Large-Scale multiple traveling salesmen problems. *Operations Research*. 1986. Vol. 34. P. 698–717.
6. Zhou H., Song M., Pedrycz W. A comparative study of improved GA and PSO in solving multiple traveling salesmen problem. *Applied Soft Computing*. 2018. Vol. 64. P. 564–580.
7. A genetic algorithm with new local operators for multiple traveling salesman problems / K.-M. Lo et al. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2018. Vol. 11. P. 692–705.
8. Blum C. Ant colony optimization: introduction and recent trends. *Physics of Life Reviews*. 2005. Vol. 2. P. 353–373.
9. Krishna H., Singh R. An approach for solving multiple travelling salesman problem using ant colony optimization. *Computer Engineering and Intelligent Systems*. 2015. Vol. 6. P. 13–17.
10. An effective parallel approach to solve multiple traveling salesmen problem / A. Othman et al. *Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (AI2SD'2018)*. Ezziyyani, Mostafa. Cham : Springer International Publishing, 2019. P. 647–664.
11. A novel hybrid approach for solving the multiple traveling salesmen problem / Y. Harrath et al. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. 2019. Vol. 26. P. 103–112.

Trofymenko I.V., Voichenko T.O., Plita L.L., Fedunov V.M. DEVELOPMENT OF PROPOSALS FOR THE APPLICATION OF METAHEURISTIC ALGORITHMS IN THE PROBLEMS OF MULTIAGENT ROUTING OF SEA FREIGHT TRANSPORTATION

The aim of the article is to develop proposals for the application of metaheuristic algorithms in the problems of multiagent routing of sea freight in the context of synthesizing clustering algorithms for the multiagent traveling salesman problem. This goal is achieved by investigating the use of evolutionary multiagent algorithms to solve problems such as the multiagent traveling salesman problem and by analysing their efficiency and optimization capabilities. To distribute vertices among traveling agents, clustering using the maximum cut algorithm is applied. The prospects of the clustering method (in particular, based on the construction of maximum intersections) in combination with metaheuristics are investigated. If the network has been pre-processed taking into account its structure, i.e., the division of the network graph into subgraphs (clustering) has been detected, the problem of building salesmen's routes on a network of smaller dimensionality can be solved. Hybrid algorithms can optimize basic algorithms, as revealed by the study of algorithms on known graphs. It is determined that in applied routing problems, such as the salesman problem for sea freight, it is more optimal to combine several approaches, including clustering and designing the network into a simpler structure with polynomial solution complexity. The most significant result is the structure of the procedure for synthesizing clustering algorithms and solving the traveling salesman problem for sea freight transportation. This approach to algorithm synthesis can be used not only for the traveling salesman problem, since the objective function can be used for any discrete optimization problem on graphs where clustering is required and a convergence condition for the synthesis algorithm can be formulated.

Key words: sea freight transportation, multi-agent routing, traveling salesman problem, clustering, optimal route.

Урум Н.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

Маннапова О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Рященко О.І.

Державний університет інфраструктури та технологій

Лісовський С.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

ПОРІВНЯННЯ ВИКИДІВ ЗГОРЯННЯ НОВІТНІХ СУДНОВИХ ПАЛИВ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ

Метою роботи є розробка методики оцінки функціональних якостей випробуваних палив і встановлення рейтингу для прийняття раціональних експлуатаційних рішень щодо їхнього подальшого застосування для живлення повнорозмірних суднових двигунів. Поставлена мета досягається шляхом випробування на лабораторному стенді модифікованих суднових палив у класичному одноциліндровому чотиритактному дизелі з модифікованою системою подачі палива в реальних умовах експлуатації двигуна із запалюванням від стиснення та аналізі отриманих результатів. Отримання порівняно однакових умов випробувань досягається заміною мастила і наконечників паливної форсунки перед кожним випробуванням двигуна на іншому паливі. Для порівняльного аналізу випробуваних суднових палив реєстрація контрольних параметрів проводиться на одному і тому ж еталонному навантаженні двигуна в трьох/чотирьох серіях вимірювань. На основі результатів проведених вимірювань можна побудувати діаграму Санкі, гістограму об'ємних часток шкідливих і токсичних газів у відпрацьованих газах двигуна та характеристичні коефіцієнти корисної дії енергетичних процесів. Вимірювальна система дозволяє знімати діагностичні дані і точно спостерігати робочі і супутні процеси під час різних режимів роботи двигуна і всієї пропульсивної установки. За результатами, отриманими вимірювальною системою, оцінювався технічний стан робочого простору і системи впорскування двигуна. За результатами випробувань може бути прийнято рішення щодо їх перенесення для живлення повнорозмірних суднових двигунів на основі багатокритеріальної оцінки з використанням інструментарію дослідження операцій. Для оцінки складного явища за набором діагностичних параметрів проведено нормалізацію вихідних змінних, що дозволяє застосовувати процедуру агрегування для отримання значень агрегованої змінної для побудови рейтингу системи. Для оцінки придатності досліджуваних суднових палив запропоновано фізичну модель діагностичних параметрів, найбільш чутливих до зміни застосовуваного палива. Виділені діагностичні параметри поділялися на стимулятори, дестимулятори і номінанти.

Ключові слова: фізична модель, відпрацьовані гази, метод, дизельний двигун, рейтинг, стимулятор, дестимулятор, номінант.

Постановка проблеми. В останні роки ІМО ввела серйозні обмеження щодо кількості шкідливих викидів у морську атмосферу з відпрацьованими газами суднових двигунів. Для рішення цієї проблеми провідні морські країни почали широко застосовувати низькосірчисті судові палива. Тому для оцінки ефектів згоряння і викидів цих палив проводиться низка прикладних досліджень на повнорозмірних суднових двигунах або випробувальних стендах [1–5]. За їх результатами визначаються основні енергетичні та емісійні

параметри двигуна конкретного типу, а також гарантований час роботи його конструктивних елементів.

Під час випробувань досліджується застосування і фактичний вплив на структуру основних функціональних підсистем двигуна нестандартного палива. Для зменшення матеріальних витрат, часу проведення досліджень та ін. випробування проводяться в лабораторних умовах на спеціально адаптованих і дозованих стендах [1]. При цьому також досліджується взаємозв'язок кількості

використовуваного пального і викидів в атмосферу шкідливих речовин у складі вихлопних газів двигуна.

Але такі модифіковані суднові палива матимуть високу щільність та в'язкість і високу температуру під час розпилення. Випробувальний двигун правильно функціонує лише за умови постійного підтримання в'язкості палива, що впорскується в камеру згоряння. Цей процес стає особливо чутливим при перемиканні живлення двигуна з дистильованого палива (пуск і зупинка) на низькосірчисте (тривала робота) і навпаки. За результатами лабораторних випробувань судового палива однозначно оцінюється його придатність для впровадження в системах живлення повнорозмірних судових двигунів за умови періодичної оцінки їх технічного стану [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив новостворених низькосірчистих судових палив на функціонування та довговічність дизельного двигуна досліджено недостатньо. Це – абсолютно нова експлуатаційна проблема, пов'язана з радикальним обмеженням вмісту сірки в судових паливах і появою на паливному ринку модифікованих судових палив.

Більш того, це питання загострюється у зв'язку із введенням у дію нових жорстких екологічних норм. Тому науковці і практики наполегливо працюють над зниженням екологічного навантаження засобів водного транспорту, особливо зменшенням шкідливих відходів від роботи дизелів.

Робота [2] вивчає особливості застосування штучних нейронних мереж як альтернативу прямим вимірюванням концентрації оксидів азоту у вихлопних газах судового дизеля, що проводяться на судні в морі. Наведено результати лабораторних досліджень і моделювання певних процесів за допомогою обраних мереж.

У роботі [3] розглянуто можливість використання альтернативних видів палива (нафтового палива, природного газу та водню) для скорочення викидів за конкурентними цінами. Було розроблено чисельну модель, за результатами якої встановлено, що водень є самим дорогим для морських застосувань, але в найчистішому паливом по відношенню до CO_2 , вуглеводнів (НС) та оксиду вуглецю (СО). Природний газ дешевший і чистіший за мазут щодо викидів CO_2 і СО, але викидає більше NO_x і НС, ніж нафтове паливо. Викиди SO_x в основному залежать від вмісту сірки в кожному конкретному виді палива.

У роботі [4] досліджено варіант зменшення забруднення морського середовища через застосу-

вання трипаливних двигунів: водень-природний газ-дизель. Доведено, що трипаливний двигун має швидшу реакцію і кращі показники потужності, ніж двопаливний двигун (CH_4 +дизель), а викиди вихлопних газів суден у зв'язку зі збільшенням частки водню значно зменшуються.

У роботі [5] наведені результати тестування морського дизельного палива з низьким вмістом сірки в морських дизельних двигунах при їх різних навантаженнях. Встановлено, що викиди CO_2 і НС значно зменшилися при навантаженні від 25% до 75%, а при 100% навантаженні дещо збільшилися. Викиди НС або СО при чотирьох робочих режимах були нижчими за гранично допустимі. Хоча частка NO_x у вихлопних газах зростала зі збільшенням навантаження на двигун, але викиди NO_x завжди були в допустимих межах. Тестовий двигун показав хороші показники викидів, які відповідають поточним вимогам ІМО щодо викидів.

Роботу [6] присвячено дослідженню впливу фізичних властивостей альтернативних видів палива на продуктивність судового дизельного двигуна. Вивчені різниці тиску і температури в циліндрі для різних альтернативних видів палива, доведені їх мінімальні значення для важкої нафти. Також доведено, що через гірше згоряння, маса сажі має максимальне значення для важкого мазуту.

У роботі [7] розглянуто вплив додавання нерафінованих і рафінованих біодизелів на мастильність здатність дизельного палива та їхній вплив на підсумкову концентрацію шкідливих речовин у ВГ.

Робота [8] також присвячена вивченню питань зменшення забруднення вихлопних газів у дизельних двигунах при порівнянні мастильних властивостей біодизельних сумішей та чистого нафтового дизельного палива. За результатами досліджень встановлено, що у випадку з біодизелем викиди O_2 можуть бути збільшені на 12,85%, а викиди диму можуть бути зменшені до 15,89%, що свідчить про доцільність застосування біодизельних добавок для покращення експлуатаційних характеристик двигуна.

Мастильні характеристики судових дистильованих палив та їх вплив на кінцеві результати викидів шкідливих речовин у вихлопних газах морських дизелів розглянуто у роботі [9].

Робота [10] надає рекомендацій екіпажу щодо особливостей експлуатації суден, що використовують паливо з меншим вмістом сірки, та варіанти дій щодо зниження вмісту шкідливих речовин у ВГ.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка методики оцінки функціональних якостей випробуваних палив і встановлення рейтингу для прийняття раціональних експлуатаційних рішень щодо їхнього подальшого застосування для живлення повнорозмірних судових двигунів.

Виклад основного матеріалу. Центральним елементом лабораторного стенду для випробування модифікованих судових палив є класичний одноциліндровий чотиритактний дизель з модифікованою системою подачі палива [11]. Через пасову передачу двигун приводить в дію генератор постійного струму, який живить систему підігріву «важкого палива». Двигун має максимально спрощені системи подачі палива і повітря, охолодження і змащення, що позитивно відбивається на балансуванні енергетичних процесів.

Установка зовнішнього паливоподавання гарантує точне підтримання необхідних значень параметрів впорскуваного палива під час роботи, особливо при переході системи живлення з дистильованого палива на залишкове (і навпаки). На стенді це реалізоване ручним змішуванням обидвох видів палива за допомогою триходових клапанів. Але при цьому порушилася термічна стабільність і чутливість до будь-яких збурень потоку, у т. ч. при зміні навантаження на двигун. Стабілізацію температури і в'язкості палива в баках і підтримання інтенсивності його нагріву забезпечують точні електронні термостати з ПІД-регулюванням.

Схема організації випробувань модифікованих судових палив є такою. На першому етапі зразок досліджуваного палива очищується від води і твердих частинок на центрифугі стенді. Це забезпечує захист системи впорскування досліджуваного двигуна від руйнівного впливу забрудненого палива. Багато зусиль спрямовано на підтримання максимально можливої температури завихреного палива протягом процесу центрифугування. Однак, «занадто ретельне» центрифугування палива не відповідає реальним умовам живлення двигунів на судах, де кількість відокремленого шламу не перевищує 3% від загального підйому палива.

Далі визначається елементарний хімічний склад та теплотворна здатність центрифугованого зразка досліджуваного палива. За визначеною теплою згоряння палива точно розраховується кількість хімічної енергії, що підводиться до камери згоряння випробовуваного двигуна. Визначення затримки самозаймання досліджуваного палива за допомогою цетанового числа (дистильовані палива) або індексу CCAI (залишкові

палива) дозволяють здійснювати подальший аналіз ефективності робочого процесу.

Маючи повну апостеріорну характеристику досліджуваного палива, проводять його випробування в реальних умовах експлуатації двигуна із запалюванням від стиснення. Отримання порівняно однакових умов випробувань досягається заміною мастила і наконечників паливної форсунки перед кожним випробуванням двигуна на іншому паливі.

Запис енергетичних та емісійних характеристик дизеля, що працює на різних видах судових палив, починається в останню хвилину 20-хвилинного періоду сталої роботи двигуна при заданому навантаженні [1]. Для порівняльного аналізу випробуваних судових палив з точки зору їх енергетичних та емісійних якостей реєстрація контрольних параметрів проводиться на одному і тому ж максимально досяжному еталонному навантаженні двигуна в трьох/чотирьох серіях вимірювань.

Результати проведених вимірювань дозволяють побудувати діаграму потоку енергії в досліджуваному двигуні і всій пропульсивній установці (діаграма Санкі). Також будуються гістограма об'ємних часток шкідливих і токсичних газів у відпрацьованих газах двигуна та характеристичні коефіцієнти корисної дії енергетичних процесів.

Випробування двигуна у нестационарних режимах має на меті оцінку його динамічних профілів під час переходу від одного стаціонарного режиму до іншого. Система керування досліджуваного дизеля дозволяє проводити ступінчасті зміни моменту навантаження, відповідним чином регулюючи струм якоря генератора.

В експериментальній установці використано стандартний дизельний двигун Farquhann типу D10 і генератор постійного струму, призначений для приводу допоміжних пристроїв в силових установках суден. У випробуваннях нового виду судового палива використовувалося вузькоспеціалізоване вимірювальне обладнання.

Контрольовані режими роботи двигуна і керуючі параметри були усереднені і піддані статистичному аналізу. Дисперсії зафіксованих значень вимірювань навколо середніх значень не перевищували 4%.

До складу вимірювальної системи входили мобільний електронний індикатор LEMAG PREMETS, аналізатор відпрацьованих газів KIGAZ 300PRO, реєстратор та аналізатор вібрацій SVAN 956 й інфрачервона камера HERMO

GEAR G30. Це обладнання дозволяло знімати діагностичні дані і точно спостерігати робочі і супутні процеси (вібрації основи фундаменту і теплове випромінювання двигуна) під час різних режимів роботи двигуна і всієї пропульсивної установки.

За результатами, отриманими вимірювальною системою, оцінювався технічний стан робочого простору двигуна ендоскопічним методом і системи впорскування двигуна камерою для швидкої фіксації зображення.

Для цього використовувалися такі параметри лабораторного стенду: частота обертання колінчастого валу двигуна, тиск індикації, витрата і температура палива, витрата і температура охолоджувальної води, температура мастила, температура вихлопних газів, струм навантаження генератора (якоря), напруга на клеммах якоря генератора, вміст CO , NO_x , CO_2 , O_2 , HC у вихлопних газах, надлишок повітря, температура зовнішніх поверхонь двигуна (термограма), вібраційне прискорення.

В експерименті використовувалися суднові легкі (дистилятні) палива MGO і MDO і суднові модифіковані палива – RMG 380; RME 180; RMD 80/L і суднове дизельне паливо з наднизьким вмістом сірки RMD 80/S (вміст сірки менше 0,1% від ваги).

Газоподібні викиди досліджуваного двигуна CO / NO_x / CO_2 / O_2 / HC вимірювалися мобільним регістром. Невизначеність вимірювання не перевищувала 4%. Отримані результати апроксимували лінійними функціями, а потім усереднювали. Значення перших 30 с відкидали через обтяження грубими похибками, викликаними збуренням при проходженні вихлопних газів навколо вимірювального зонда аналізатора.

Обмеження на викиди твердих частинок (ТЧ) у вихлопних газах суднових двигунів під час їхньої роботи в експерименті не застосовуються. Однак, викиди ТЧ є важливим показником якості викидів суднового палива. Радикальне скорочення викидів SO_x і NO_x у вихлопних газах суднових двигунів також сприятиме мінімізації ТЧ (шляхом застосування скрубєрів, сорбційних реакторів і каталітичних перетворювачів).

Спроба розробки відповідної технології моніторингу викидів твердих частинок у вихлопах суднових двигунів поки не вирішена. Це пояснюється тим, що додатково використана вимірювальна система відпрацьованих газів двигуна не повинна втручатися в роботу випробуваного двигуна і його штатної вимірювальної системи.

Метою вимірювання віброшвидкості на фундаменті є непряме визначення кількості енергії, що розсіюється, для виникнення вібрацій. Вона розглядається як показник стійкості двигуна під час роботи на різних видах палива. Оброблені дані вимірювань, що дають середньоквадратичне значення віброшвидкості, визначалися за допомогою середньочастотного фільтра 10 Гц-1 кГц. Невизначеність їх вимірювання не перевищувала 4%.

Середня температура поверхні двигуна в кожній серії вимірювань реєструвалася щосекунди. Невизначеність вимірювань не більше 5%.

Всі усереднені значення зафіксованих контрольних параметрів дозволили визначити енергетичні та емісійні характеристики двигуна і розрахувати обрані діагностичні параметри придатності палива до використання. Проведені випробування на усталених і перехідних процесах дозволили оцінити вплив досліджуваних суднових палив на показники згоряння, викидів і економічності досліджуваного дизельного двигуна, а також на інтенсивність його зношування.

За результатами випробувань може бути прийнято рішення щодо їх перенесення для живлення повнорозмірних суднових двигунів. Це вимагає проведення багатокритеріальної оцінки з використанням інструментарію дослідження операцій [12].

Складні явища характеризуються багатьма діагностичними змінними, які мають різні одиниці вимірювання та різні порядки величини. Для оцінки складного явища за набором діагностичних параметрів їх вихідні змінні нормалізують. Це дозволяє використовувати процедуру агрегування для отримання значень агрегованої змінної для побудови рейтингу системи. Впорядкування об'єктів від кращого до гіршого створює об'єктивні умови для прийняття раціональних рішень щодо їх застосування (рис. 1).

Оцінка придатності досліджуваних суднових палив здійснювалася відповідно до запропонованої фізичної моделі (рис. 2). Модель мала десять діагностичних параметрів, найбільш чутливих до зміни застосовуваного палива. Роль виділених діагностичних параметрів в оцінці функціональної якості розглянутих суднових палив полягала у такому [13]:

- стимулятори – параметри, що позитивно впливають на оцінку впливу палива на роботу двигуна;

- дестимулятори – параметри, що негативно впливають на оцінку впливу палива на роботу двигуна;



Рис. 1. Спрощена схема створення рейтингу об'єктів

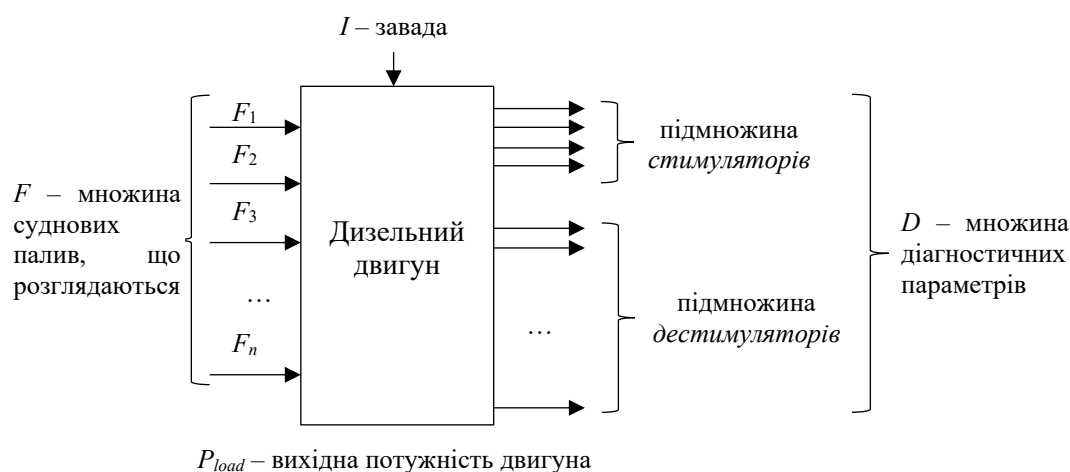


Рис. 2. Фізична модель використання палива у дизельному двигуні

– номінанти – параметри, що позитивно впливають на оцінку впливу палива на роботу двигуна тільки для номінальних значень або діапазонів.

Множину діагностичних параметрів у запропонованій фізичній моделі складається з трьох підмножин:

1) підмножини *стимуляторів*, збільшення (зменшення) значення яких сприймається як збільшення (зменшення) оцінки функціональної якості палива:

- термічного ККД двигуна, у відсотках – η_{th} ;
- інтенсивність зміни частоти обертання колінчастого валу в перехідному процесі двигуна, в $1/c^2$ – n_{tr} ;

- середня інтенсивність зміни тиску впорскування від моменту відкриття форсунки до моменту досягнення максимального тиску впорскування – Ψ_1 ;

- середня інтенсивність зміни тиску впорскування від моменту досягнення максимального тиску впорскування до моменту закінчення впорскування – Ψ_2 ;

2) підмножини *дестимуляторів*, збільшення (зменшення) значення яких сприймається як

зменшення (збільшення) оцінки функціональної якості палива:

- швидкість підвищення тиску в циліндрі, в МПа/°CSR – dp/da ;

- відсотковий внесок діоксиду вуглецю у відпрацьованих газах двигуна – CO_2 ;

- внесок оксиду вуглецю у відпрацьованих газах двигуна, в ppm – CO ;

- внесок оксидів азоту у відпрацьованих газах двигуна, в ppm – NO_x ;

- загальне, відносне кутове відхилення розпиленого струменя палива – Δ_{ang} ;

- загальне, відносне відхилення поверхні розпиленого струменя палива – Δ_{area} ;

3) підмножини *номінантів*, яка з точки зору оцінки якості палива має найбільш вигідне (номінальне) значення або повинна знаходитися в номінальному числовому діапазоні. Кожне відхилення значення номіналу від номінального або вихід за встановлені межі номінального діапазону означає зниження оцінки функціональної якості палива.

При детальному аналізі швидкість підвищення тиску dp/da в циліндрі двигуна можна розглядати як *номінальну* і вважати, що оптимальне зна-

чення цього параметра повинно бути в межах, наприклад, 0,2–0,8 МПа/°С. Тоді перевищення як нижньої межі діапазону, що означає зниження ефективності робочого процесу, так і верхньої, що свідчить про занадто «жорстку» роботу двигуна, яка призводить до надмірних навантажень на його механічну систему, означає зниження оцінки функціональної якості палива. При трактуванні цього параметра як дестимулятора передбачається, що та ж потужність двигуна досягається при його «м'якшій» (яка є бажаною) роботі.

У таблиці 1 наведено значення діагностичних параметрів та їх діапазони, визначені під час енергетичних випробувань різних видів суднових палив [1]. Аналіз результатів показав, що найкращий функціональний вплив на роботу двигуна (стимулятор) має дистилатне паливо F_6 . Однак за параметрами, значення яких повинні бути якомога нижчими (дестимулятор), найвигоднішим є паливо F_2 (залишкове). Остаточне рішення щодо найвищої експлуатаційної якості палива прийматиметься із використанням методів дослідження операцій.

Визначені діагностичні параметри (табл. 1) мають різні одиниці виміру і різні порядки величин, що потребує нормалізації їх вихідних значень до безрозмірних величин [13, 14] методом нульової унітаризації [15]. Її основою є ратіометричне перетворення, яке гарантує знаходження нормованих діагностичних параметрів у діапазоні від 0 до 1.

Нехай D_j , $j = \overline{1,10}$ – множина діагностичних параметрів, а F_i , $i = \overline{1,6}$ – множина суднових палив. Тоді визначимо [15]:

– значення діапазону для кожної стандартизованої змінної, як постійної точки відліку:

$$R(D_j) = \max d_{ij} - \min d_{ij}; \quad (1)$$

– значення стимуляторів:

$$u_{ij} = \frac{d_{ij} - \min d_{ij}}{\max d_{ij} - \min d_{ij}}; \quad (2)$$

– значення дестимуляторів:

$$u_{ij} = \frac{\max d_{ij} - d_{ij}}{\max d_{ij} - \min d_{ij}}; \quad (3)$$

– значення синтетичних змінних:

$$Q_i = \sum_{j=1}^6 u_{ij}. \quad (4)$$

За значеннями Q_i для досліджуваних суднових палив будується їхній рейтинг, відповідно до скоригованих критеріїв оцінки ефективності – енергії та якості викидів (табл. 2, рис. 3). У цьому рейтингу дистилатні палива F_5 та F_1 займають, відповідно, перше ($Q_1 = 6,455498$) і третє ($Q_2 = 4,384817$) місця, за ними йдуть модифіковані залишкові палива.

Розширення набору діагностичних параметрів зазвичай призводить до зміни позицій лідируючих дистилатних палив у рейтингу на користь модифікованих (залишкових).

Залишкове паливо F_6 зі значенням синтетичної змінної $Q_3 = 2,267845$ характеризується найнижчою функціональною якістю за прийнятими критеріями оцінки.

Висновки. Експерименти, проведені на одноциліндровому чотиритактному дизельному двигуні з природним всмоктуванням на основі шести різних суднових низькосірчистих палив, дозволили оцінити їх вплив на енергетичні та емісійні параметри і деградацію компонентів двигуна.

За одержаними експериментальними даними оцінені функціональні якості випробуваних палив і встановлено їхній рейтинг. Він дозволяє приймати раціональні експлуатаційні рішення щодо

Таблиця 1

Зведені значення вимірювань діагностичних параметрів та їх діапазони R , що характеризують функціональну якість суднових палив

і-ий вид морського палива	j-ий діагностичний параметр									
	Стимулятор				Дестимулятор					
	η_{ih}	Δn_{ir}	Ψ_1	Ψ_2	$dp/d\alpha$	CO	CO_2	NO_x	Δ_{ang}	Δ_{area}
$F_1 (MGO)$	58,75	0,095	0,0596	0,0758	0,639667	487	8,66	504	13,8	8,1
$F_2 (RMG)$	58,58	0,030	0,0617	0,0876	0,469333	364	7,95	392	73,9	49,7
$F_3 (RMD)$	59,06	0,033	0,0529	0,0568	0,49472	391	8,05	400	83,3	65,0
$F_4 (RME)$	58,80	0,032	0,0488	0,0570	0,481667	256	8,37	476	45,9	25,9
$F_5 (MDO)$	61,79	0,165	0,653	0,0700	0,613	383	8,03	542	57,4	23,8
$F_6 (RMD)$	60,07	0,043	0,0524	0,0617	0,56	421	8,57	658	71,3	53,1
$R(D_j)$	3,21	0,135	0,0165	0,0308	0,170334	231	0,71	266	69,5	56,9

Таблиця 2

Перелік стандартизованих значень діагностичних параметрів та значення синтетичної змінної, покладених в основу багатокритеріальної оцінки енергетичної та емісійної якості досліджуваних суднових палив

Морське паливо	Стандартизовані значення діагностичних параметрів										Синтетичні значення змінних Q_{i1}	Ранг палива
	Стимулятор				Дестимулятор							
	u_{i1}	u_{i2}	u_{i3}	u_{i4}	u_{i5}	u_{i6}	u_{i7}	u_{i8}	u_{i9}	u_{i10}		
F_5 (MDO)	1	1	1	0,429	0,157	0,450	0,887	0,436	0,373	0,724	6,455	1
F_2 (RMG)	0	0	0,7818	1	1	0,532	1	1	0,135	0,269	5,718	2
F_1 (MGO)	0,053	0,481	0,6545	0,617	0	0	0	0,579	1	1	4,385	3
F_4 (RME)	0,069	0,015	0	0,006	0,928	1	0,408	0,684	0,538	0,687	4,335	4
F_3 (RMD)	0,150	0,022	0,2485	0	0,851	0,416	0,859	0,970	0	0	3,516	5
F_6 (RMD)	0,532	0,096	0,2182	0,159	0,468	0,286	0,127	0	0,173	0,209	2,268	6

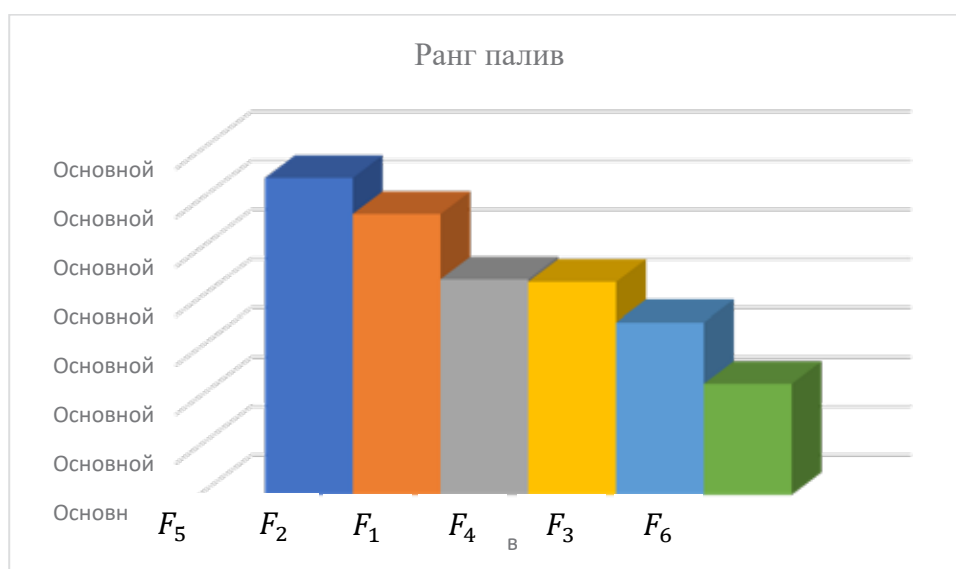


Рис. 3. Рейтинг енергетичних та емісійних властивостей досліджуваних суднових палив

подальшого застосування палив для живлення повнорозмірних суднових двигунів:

1) Дистилятне паливо MDO F_5 , застосоване у експериментальному двигуні, дає найвищий термічний коефіцієнт корисної дії $\eta_c = 61,79\%$, а залишкове паливо RMG F_2 – коефіцієнт корисної дії $\eta_c = 58,58\%$.

2) Найкращі динамічні властивості в перехідному процесі продемонстрував двигун, що працював на дистилятному паливі MDO F_5 , а найгірший показник двигун, що працював на залишковому паливі RMG F_2 .

3) Дистилятне паливо MDO F_5 створювало найсприятливіші умови роботи системи впорскування випробуваного двигуна. Найменш сприятливі умови для двигуна створювало залишкове паливо RME F_4 .

4) Найбільш сприятливий перебіг процесу згоряння найбільша швидкість підвищення тиску

в циліндрі) забезпечило залишкове паливо RMG F_2 , а найменш сприятливий – дистилятне паливо MGO F_1 .

5) Найменший викид оксиду вуглецю видавав двигун, що працював на залишковому паливі RME F_4 , а найбільший – що працював на дистилятному паливі MGO F_1 .

6) Найнижчий рівень викидів вуглекислого газу досягнутий для двигуна, що працює на залишковому паливі RMG F_2 , а найвищий – що працює на дистилятному паливі MGO F_1 .

7) Найнижчий рівень викидів оксидів азоту був досягнутий для двигуна, що працював на залишковому паливі RMG F_2 , а найвищий – для двигуна, що працював на залишковому паливі RMD F_6 .

8) Найбільш сприятливі умови роботи форсунки отримані для двигуна, що працює на дистилятному паливі MGO F_1 , а найменш сприятливі –

для двигуна, що живився залишковим паливом $RMD F_3$.

9) Найвищу функціональну якість, оцінену на основі багатокритеріального аналізу, показало дистилатне паливо $MDO F_5$, а найнижчу – залишкове паливо $RMD F_6$. При врахуванні найвищої ціни палив MDO найкращим для живлення повнорозмірних суднових двигунів слід вважати значно дешевше залишкове паливо $RMG F_2$.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження можуть бути покладені в новітню методику випробувань новостворених суднових палив в реальних умовах експлуатації дизельного двигуна. Даний підхід дає змогу комплексно оцінити придатність різних видів палив для живлення суднових двигунів і приймати економічно обґрунтовані рішення щодо впровадження нового виду суднового палива в експлуатацію.

Список літератури:

1. Method of assessing ecological, energy and reliability effects of using modified marine fuels to power Diesel engines in real conditions / Z. Korczewski et al. *Project No. RX-10/2017*. Gdańsk University of Technology. PL, 2019.
2. Kowalski J. ANN based evaluation of the NOx concentration in the exhaust gas of a marine two-stroke diesel engine. *Polish Maritime Research*. 2009. № 16. P. 60–66. URL: <https://doi.org/10.2478/v10012-008-0023-7>.
3. Numerical analysis of emissions from marine engines using alternative fuels / M.I. Lamas et al. *Polish Maritime Research*, 2015, 22, P. 48–52. URL: <https://doi.org/10.1515/pomr-2015-0070>. (date of access: 08.10.2024)
4. A numerical and experimental study of marine hydrogen natural gas–diesel tri–fuel engines / R. Zhao et al. *Polish Maritime Research*. 2020. № 27. P. 80–90. URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0068>. (date of access: 08.10.2024)
5. Yang Z., Tan Q., Geng P. Combustion and emissions investigation on low-speed two-stroke marine diesel engine with low sulfur diesel fuel. *Polish Maritime Research*. 2019. № 26. P. 153–161. URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0017>. (date of access: 08.10.2024)
6. Analysis of the influence of marine fuels properties on the energy performance of a diesel engine, the reliability of its operation and the wear of its parts / Z. Korczewski et al. *Report*. 2019.
7. Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers / Hu J et al. *Fuel*. 2005. P. 1601–1606.
8. Crutchley I. Low sulphur diesel can lead to extensive wear. *Ship & Offshore*. 2010. № 4. P. 14–17.
9. Crutchley I., Green M. Lubricity characteristics of Marine Distillate fuels. *Industrial Special Edition MTZ*. 2012. P. 58–62.
10. Guideline for the Operation of Marine Engines on Low Sulphur Distillate Diesel. *MAN Diesel & Turbo*. 2013. 23 p.
11. Korczewski Z., Marszałkowski K., Rudnicki J. The concept of research on ecological, energy and reliability effects of modified marine fuel oils application to supply compression-ignition engines in real conditions. *Combustion Engines*. 2017. № 171(4). P. 56–61.
12. Bellman R. Dynamic programming. Princeton University Press. 1957.
13. Operations research in examples and tasks / Z. Jędrzejczyk et al. Warszawa. PWN. 2011.
14. Winston W. L. Operations research: Applications and algorithms. Canada: Thomson Learning Inc., 2004. 1418 p.
15. Kukuła K. Zero unitarisation method. Warszawa: PWN, 2000.

Urum N.S., Mannapova O.V., Riashchenko O.I., Lisovskyi S.V. COMPARISON OF COMBUSTION EMISSIONS OF THE LATEST LOW-SULPHUR MARINE FUELS

The aim of the work is to develop a methodology for assessing the functional qualities of the tested fuels and establishing a rating for making rational operational decisions on their further use to power full-size marine engines. This goal is achieved by testing modified marine fuels in a classic single-cylinder four-stroke diesel engine with a modified fuel supply system on a laboratory bench under real-world conditions of compression-ignition engine operation and analysing the results. Comparable test conditions are achieved by changing the lubricant and fuel injector tips before each engine test on a different fuel. For the comparative analysis of the tested marine fuels, the control parameters are recorded at the same reference engine load in three/four series of measurements. Based on the results of the measurements, it is possible to build a Sankey diagram, a histogram of the volume fractions of harmful and toxic gases in the engine exhaust gases and characteristic efficiency of energy processes. The measuring system allows for the acquisition of diagnostic data and accurate observation of operating and related processes during various modes of operation of the engine and the entire

propulsion system. Based on the results obtained by the measuring system, the technical condition of the working space and the engine injection system was assessed. Based on the results of the tests, a decision can be made to transfer them to power full-size marine engines based on a multi-criteria assessment using operations research tools. To evaluate a complex phenomenon by a set of diagnostic parameters, the output variables were normalised, which allows the aggregation procedure to be applied to obtain the values of the aggregated variable for building the system rating. To evaluate the suitability of the studied marine fuels, a physical model of the diagnostic parameters that are most sensitive to changes in the fuel used is proposed. The selected diagnostic parameters were divided into stimulants, destimulants and nominators.

Key words: *physical model, exhaust gases, method, diesel engine, rating, stimulator, destimulator, nominee.*

Фомін О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Козинка О.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

Скок П.О.

Державний університет інфраструктури та технологій

Черкашин О.П.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

Красулін О.С.

Приазовський державний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ КОНЦЕПТИ КУЗОВІВ НАПІВВАГОНІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

В цій статті розглянуті нові матеріали та лакофарбові матеріали, які відіграють особливу роль в машинобудуванні: захист від корозії та механічних коливань, які значно впливають на міцність та довговічність конструкцій. Перспективних концептів моделей кузова напіввагону з нових матеріалів та застосування захисних покриттів для покращення техніко-економічних показників. В роботі були розглянуті основні переваги захисних покриттів. На даний час пофарбувати металеву поверхню неефективно з точки зору антикорозійного захисту. На конвеєрах деталі кузова покривають кількома шарами, кожен із яких посилює загальний ефект. Як усім відомо, основний ворог металу – корозія, його захищають від зовнішнього впливу всіма доступними методами: оцинковуванням, покриттям антикорозійними складами, грунтовками та, звичайно, суцільним шаром фарби. Лакофарбове покриття автомобіля має поєднувати в собі дві протилежні якості: бути одночасно твердим та еластичним. Міцність шару фарби потрібна для стійкості проти механічних пошкоджень, а еластичність – для адаптації до впливу холоду та спеки на метал (розширення та стиснення металевих частин веде до розтріскування фарби). Існують різні види автоемалей: акрилові, алкідні, поліуретанові, і кожен з них має свої особливості. Розглянули автоемалі, які є декоративними покриттями, призначеними для надання автомобілю блиску і яскравого кольору. Металеві фарби для авто містять спеціальні частинки, що надають поверхні особливого блиску і глибини кольору, а також його переливів. Епоксидні фарби на основі епоксидних смол найчастіше застосовуються як ґрунтувальне покриття для металу. Двокомпонентні покриття, засновані на поліуретанових смолах. Вони відрізняються високою міцністю і довговічністю, що робить їх оптимальним вибором для автомобілів, які експлуатуються у важких умовах. Також було розглянуто найсучасніші і високотехнологічні різновиди полімерних покриттів. Існує досить багато полімерних матеріалів, що використовуються для обробки кузовних деталей автомобіля. Також розглянули новий вид захисних покриттів на основі синтетичних компонентів (рідке скло) та кремнію (нанокераміка).

Ключові слова: машинобудування, транспорт, рухомий склад, кузов напіввагона, захисне покриття, нові матеріали, експлуатація, надійність.

Постановка проблеми. Захист промислового обладнання та устаткування має вирішальне значення для промислового середовища з будь-якими складними умовами. Промислові деталі часто зношуються внаслідок витирання, ерозії, хімічного впливу, корозії та механічних пошкоджень. Деталі, які не захищені належним чином,

не функціонуватимуть належним чином, і це може створювати небезпеку на роботі, що призводить до дорогої заміни деталей.

Техніко-економічна ефективність різних типів вагонів визначається капітальними витратами на будівництво та технічне утримання їх в експлуатації, віднесеними на вимірювач роботи

на кожному циклі експлуатації (періоді між заводськими ремонтами) та за весь термін служби з урахуванням простоїв у ремонті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукова робота [1, с. 87] спрямована на дослідження екологічно безпечних полімерних покриттів у сфері автомобільної індустрії, що постійно привертає увагу вчених та практиків. У статті аналізується сучасний стан технологій у цій галузі, розглядаються найновіші дослідження та технологічні розробки, а також обговорюються їхні перспективи впровадження у виробництво. Починаючи з огляду новітніх досліджень лакофарбових матеріалів, виконується розгляд самовідновлювальних матеріалів та мікрокапсул, які мають потенціал для створення стійких та довговічних покриттів.

В роботі [2, с. 33] був проведений експеримент завдяки додавання оксиду графену, помірно відновленого оксиду графену і функціоналізований графен були додані до водорозчинної поліуретанової матриці як антикорозійне армування відповідно. Антикорозійні властивості оксиду графену та його похідних посилені поліуретанових композитних покриттів були охарактеризовані за допомогою електрохімічної імпедансної спектроскопії і випробувань на сольовий туман.

У статті [3, с. 129] розглянуті різні методи випробування лакофарбових покриттів: випробування на нейтральний сольовий туман, випробування в сольовому тумані з оцтовою кислотою (з мідним прискоренням та без мідного прискорення), циклічне випробування на корозію. Також була приділена увага таким параметрам: тривалість випробувань, температурні режими, хімічна агресивність середовища. Аналіз випробувань дає змогу встановити, які методи найбільше відповідають вимогам для визначення стійкості лакофарбових покриттів до корозії.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз нових матеріалів та лакофарбових матеріалів, які відіграють особливу роль в машинобудуванні: захист від корозії та механічних коливань, які значно впливають на міцність та довговічність конструкцій. Перспективних моделей кузова напіввагону з нових матеріалів та застосування захисних покриттів для покращення техніко-економічних показників.

Для досягнення поставленої мети, треба виконати ряд завдань: головні характеристики техніко-економічних параметрів рухомого складу; інноваційні матеріали в автомобілебудуванні;

причини корозії металу та захисні покриття в машинобудуванні; матеріали для захисту металевих конструкцій кузова.

Виклад основного матеріалу. З найбільшою економічністю експлуатуються напіввагони, у яких перевозиться більше половини вантажів. Головною характеристикою вантажного вагона є вантажопідйомність. Максимальна маса вантажу, яку можна перевезти у вагоні за умовами міцності та безпеки руху (чим біша вантажопідйомність, тим більша продуктивність вагона) [4, с. 219; 5, с. 1331]. Так називають ту саму велику вагу вантажу, яку можна транспортувати в цьому вагоні. Універсальний сучасний варіант дозволяє перевезти близько сімдесяти тонн за один раз.

Тара вагона – власна маса вагона у порожньому стані. Маса тари обмежена матеріалами, що забезпечують міцність та надійність конструкції вагона. Коефіцієнт тари, розрізняють технічний, вантажний та експлуатаційний. Технічний коефіцієнт тари – відношення тари до вантажопідйомності. Чим менший технічний коефіцієнт тари тим вигідніший вагон в експлуатації.

У більшості автомобілів деталі кузова, за винятком бамперів, виготовляються з різного металу: алюмінію або сталі різної твердості (хоча в цій ролі можна зустріти і карбон, який поки що занадто дорогий для масового використання [6, с. 240]. Незважаючи на сучасні матеріали та технології, більшість кузовів робиться зі сталі, що володіє такими перевагами як міцність (можна використовувати тонкі листи), відносна легкість формування та зварювання.

Основні переваги захисних покриттів:

- відновлення спрацьованих поверхонь і продовження терміну служби деталей, як нових, так і старих;
- збільшення ефективності конструкцій та деталей;
- економія витрат шляхом уникнення заміни деталей та зменшення запасів запасних частин;
- захист деталей від стирання, ерозії, хімічної атаки та корозії;
- забезпечення відмінної хімічної стійкості для захисту вузлів

В машинобудуванні широко починають використовувати полімерні матеріали (карбон), з яких виготовляють решітки радіатора, бампери, внутрішнє облицювання колісних арок, спойлери та молдинги, які легше і дешевше [7, с. 83; 8, с. 66]. Оскільки основний ворог металу – корозія, його захищають від зовнішнього впливу всіма доступними методами: оцинкуванням, покриттям

антикорозійними складами, ґрунтовками та звичайно суцільним шаром фарби.

Причина корозії завжди однакова: пошкодження лакофарбового покриття, яке відкриває метал для доступу води, солей та реагентів. Під впливом зовнішніх факторів на сталі з'являється іржа, що поширюється як у сторони (поверхнева корозія), так і вглиб (наскрізна корозія). Крім чисто косметичного дефекту іржа знижує функціональність деталі: несучі елементи втрачають міцність, а облицювальні – пружність, через що не можуть повністю відпрацювати на пом'якшення удару у разі ДТП.

На даний час пофарбувати металеву поверхню неефективно з точки зору антикорозійного захисту. На конвеєрах деталі кузова покривають кількома шарами, кожен із яких посилює загальний ефект.

Перший шар – захист від корозії. Це може бути покриття з цинком, та інші склади. Ґрунтовка, необхідна для оптимальної адгезії (зчеплення) з лакофарбовим шаром. Фарба як правило, наноситься в три шари: тонка підкладка, нормальної товщини основний шар і фінішна зовнішня плівка, що складається з більш розбавленої фарби, що дає рівне покриття. Лак поверх фарби може наносити в 1–2 шари прозоре лакове покриття, що дає сяючий глянець і глибину кольору.

Автоемалі є декоративними покриттями, призначеними для надання автомобілю блиску і яскравого кольору. Існують різні види автоемалей: акрилові, алкідні, поліуретанові, і кожен з них має свої особливості. Вони використовуються для створення глянцевого фінішу і захисту кузова від зовнішніх впливів.

Фарби для авто діляться на групи:

- Нітроемалі. Вже застарілі автофарби, що практично пішли з ринку, але іноді зустрічаються на старих автомобілях;

- Алкідні. Нині займають приблизно половину ринку. Алкідні фарби для автомобілів виготовляються на основі алкідних смол, що забезпечує хорошу еластичність і міцність покриття. Вони часто створюють стійкий захист від корозії, тому застосовуються для забарвлення авто з метою відновлення заводського вигляду та захисту кузова від зовнішніх факторів. Зручні у використанні: швидко сохнуть, коштують недорого. Але вимагають обов'язкового шару ґрунтовки на металі, оскільки самі по собі не є повноцінним захистом від корозії;

- Акрилові фарби для автомобілів одні з найпопулярніших і найпоширеніших. Вони виро-

бляються на основі акрилових смол і можуть застосовуватися як для базових шарів, так і як фінішне покриття. Вони бувають однокомпонентними та двокомпонентними. Однокомпонентні використовуються частіше, оскільки їх простіше наносити й вони швидше сохнуть, а двокомпонентні забезпечують більш міцне покриття завдяки додаванню затверджувачів.

- Епоксидні фарби на основі епоксидних смол найчастіше застосовуються як ґрунтувальне покриття для металу. Вони утворюють міцний захисний шар, який також відмінно запобігає появі корозії.

Переваги: висока стійкість до хімічних речовин, міцність і довговічність. Недоліки: епоксидні фарби використовуються переважно для захисту.

- Поліуретанові фарби. Двокомпонентні покриття, засновані на поліуретанових смолах. Вони відрізняються високою міцністю і довговічністю, що робить їх оптимальним вибором для автомобілів, які експлуатуються у важких умовах. Цей барвник утворює захисний шар, стійкий до впливу агресивних чинників довкілля, включно з ультрафіолетом, опадами та механічними пошкодженнями. Переваги: чудова стійкість до зовнішніх впливів; довговічність покриття; глянцева фініш. Недоліки: вони вимагають дотримання суворої технології нанесення, а значить, досвіду і навичок маляра.

- Порошкові фарби застосовуються в автомобільній промисловості для створення міцного і довговічного покриття. Вони наносяться у вигляді сухого порошку і потім запікаються при високій температурі, що забезпечує їх особливу стійкість. Переваги: Міцність. Утворює надстійке покриття, яке не боїться механічних пошкоджень і впливу навколишнього середовища. Екологічність [9, с. 220]. У процесі нанесення порошкової фарби не використовуються розчинники, що робить її більш екологічно безпечною. Недоліки: порошкові фарби не мають такої ж широкої палітри кольорів, як рідкі.

Лакофарбове покриття – це композиційні склади, що наносяться на оброблювані поверхні в рідкому або порошкоподібному вигляді рівномірними тонкими шарами і, що утворюють після висихання та затвердіння, плівку, що має міцне зчеплення з основою. Плівку, що сформувалася, називають лакофарбовим покриттям, властивістю якого є захист поверхні від зовнішніх впливів (води, корозії, температур, шкідливих речовин), надання їй певного вигляду, кольору і фактури.

Лакофарбове покриття автомобіля має поєднувати в собі дві протилежні якості: бути одночасно твердим та еластичним. Міцність шару фарби потрібна для стійкості проти механічних пошкоджень, а еластичність – для адаптації до впливу холоду та спеки на метал (розширення та стиснення металевих частин веде до розтріскування фарби).

Матеріали для захисту класифікуються за речовинами, які лежать в основі захисного покриття. Поліуретанова плівка має структуру, що нагадує гуму. Поліуретан забезпечує гідний механічний захист. Рідка гума – це один із найпростіших і найдешевших способів захисту. На поверхню кузова наноситься з пульверизатора полімерний склад, що застигає у вигляді тонкого, трохи м'якого на дотик матеріалу. На (рисунку 1) зображено перспективний концепт кузова напіввагону з захисним покриттям (рідка гума).

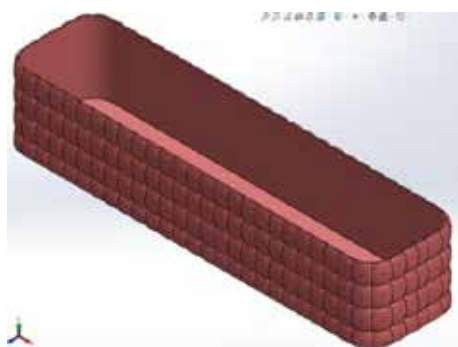


Рис. 1. Перспективний концепт кузова напіввагону з захисним покриттям (рідка гума)

Рідка гума відмінно схоплюється і з пластиком, і з металом, що дає рівне непрозоре покриття. Знімати її з кузова легко: вона відклеюється від поверхні, не пошкоджуючи лак і залишаючи слідів. По суті це гума з балона. Вона наноситься розпорошенням на вимитий та висушений кузов. Можна покрити всю поверхню кузова. Наносити можна у кілька шарів. Покриття буває прозорим чи кольоровим.

Полімерні покриття. Однією з найсучасніших і високотехнологічних різновидів полімерних покриттів є антифрикційні покриття. Існує досить багато полімерних матеріалів, що використовуються для обробки кузовних деталей автомобіля. Найбільшого поширення знаходять: 1) полісечовина – є полімером на основі двох компонентів. 2) Рідке скло – на основі синтетичних компонентів, поліролі на основі полімерної речовини. 3) Новий вид захисних покриттів на основі кремнію (нанокераміка). Розчини нано-

сяться методом полірування, створюючи шар приблизно 0,5 мкм.

Рідке скло відрізняється від кераміки (нанокераміки) тим, що наноситься в один шар (керамічне покриття може становити від 3 до 10 шарів) і відповідно служить менше. Керамічне покриття, яке застосовується на різних поверхнях для забезпечення їх довготривалого захисту. Нанесення складу здійснюється дуже тонким шаром. Затверділе керамічне покриття захищає лакофарбове покриття від впливів навколишнього середовища, таких як ультрафіолетові промені, сіль, пташиний послід і іржавий наліт, а також знижує механічні пошкодження.

Тефлон. Полімерні склади з включенням тефлонів застосовуються для обробки авто з метою підвищення водовідштовхувальних та грязевідштовхувальних властивостей.

Як напильований матеріал найчастіше виступають поліестер, пластизоль, полівінілдефторид та деякі інші. Бувають поліуретановими або полісечовинними. Поліуретан дешевше та простіше у нанесенні.

За структурою вони схожі на фарби, проте замість пігменту містять високодисперсні частинки твердих мастил: дисульфиду молібдену, графіту, політетрафторетилену (ПТФЕ) та ін. Ці компоненти рівномірно розподілені в полімерному сполучному, в якості якого можуть виступати епоксидні, акрилові, титанатові та інші смоли. На (рисунку 2) зображено перспективний концепт кузова напіввагону з захисним полімерним покриттям.

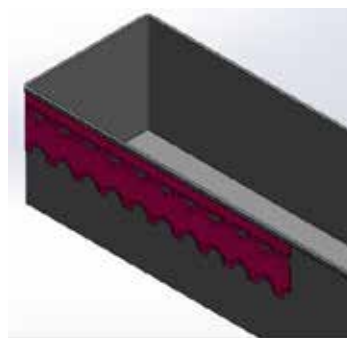


Рис. 2. Перспективний концепт кузова напіввагону з захисним полімерним покриттям

Вони різняться і на вигляд, надають поверхні фактуру, бувають дуже яскравих і навіть отруйних забарвлень. Перед нанесенням полімерних покриттів потрібно зачистити поверхню від іржі, провести знежирення, прогрунтувати, виконати антикорозійну обробку. Полімери наносяться назавжди, тобто видаляють їх разом із деталями кузова

або хоча б із фарбою. Полімерний захист – найкращий за своїми покривними характеристиками.

Висновки. 1) Економічні показники в оцінці надійності дуже важливі, оскільки підвищення рівня надійності в машинобудуванні, з одного боку, пов'язані з додатковими матеріальними витратами, з другого – зі зменшенням витрат з їхнього ремонту і обслуговування.

2) Для захисту кузова автомобіля використовують різноманітні методики та матеріали. Всі вони є єдиною метою – запобігти передчасному зносу зовнішнього покриття і продовжити термін служби.

3) Лакофарбове покриття (ЛФП) автомобіля має поєднувати в собі дві протилежні якості: бути одночасно твердим та еластичним. Міцність шару

фарби потрібна для стійкості проти механічних пошкоджень, а еластичність – для адаптації до впливу холоду та спеки на метал (розширення та стиснення металевих частин веде до розтріскування фарби). Матеріал характеризується товщиною шару, який може змінюватись між показниками 170 і 200 мікрон.

4) Деталі, оброблені полімерними речовинами, мають довгий термін служби. Рідка гума має високий ступінь адгезії, з часом добре знімається одним шматком, не залишаючи слідів. Необхідно наносити мінімум 5 шарів (товщина покриття має бути від 80 мікрон). Новий вид захисних покриттів на основі синтетичних компонентів (рідке скло) та кремнію (нанокераміка). Створюючи шар приблизно 0,5 мкм.

Список літератури:

1. Павленко В. М. / та ін. Новітні технології в екологічно безпечних полімерних покриттях: дослідження, технології, перспективи. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. № 1 (19). С. 85–94. doi: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-85-94>
2. Jing Li et al. Reinforcement of graphene and its derivatives on the anticorrosive properties of waterborne polyurethane coatings. *Composites Science and Technology*. P. 30-37.2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.04.017>
3. Павленко В. М. / та ін. Дослідження методів випробування лакофарбового покриття на стійкість до корозії. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. № 2 (18). С. 127–133. doi: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-127-133>
4. Сосунов Н. Н. Підвищення ефективності процесів експлуатації та технічного обслуговування рухомого складу у системі ремонтних підприємств галузі. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Луганск. 2006. С. 219–223.
5. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Fomin, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. 10, 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
6. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239-243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487
7. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P. 79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
8. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
9. Sergii V. Sagin, Sergii S. Sagin, Oleksij Fomin, Oleksandr Gaichenia, Yurii Zablotskyi, Václav Pištěk, Pavel Kučera. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*. 2024. 120221 ISSN 0960-1481 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>

Fomin O.V., Kozynka O.S., Skok P.O., Cherkashin O.P., Krasulin O.S. PROSPECTIVE CONCEPTS OF CAR BODIES FOR GONDOLA CARS USING NEW MATERIALS AND PROTECTIVE COATINGS

In this article, new materials and coatings are discussed, which play a crucial role in mechanical engineering: protection from corrosion and mechanical vibrations that significantly affect the strength and durability of structures. The article presents prospective concepts for the body models of hopper cars using new materials and protective coatings to improve technical and economic performance. The work discusses the main advantages of protective coatings. Currently, painting a metal surface is ineffective in terms of corrosion protection. On production lines, body parts are coated with several layers, each of which enhances the overall

effect. As is well known, the main enemy of metal is corrosion, and it is protected from external influences by all available methods: galvanizing, coating with anti-corrosion compounds, primers, and, of course, a solid layer of paint. The automotive paint coating must combine two opposite qualities: it must be both hard and elastic. The strength of the paint layer is needed for resistance to mechanical damage, while elasticity is necessary to adapt to the effects of cold and heat on the metal (the expansion and contraction of metal parts leads to cracking of the paint). There are various types of automotive enamels: acrylic, alkyd, and polyurethane, each with its own characteristics. The article also discusses automotive enamels, which are decorative coatings designed to give the vehicle a shiny and bright color. Metallic paints for cars contain special particles that provide the surface with a unique shine and depth of color, as well as its color transitions. Epoxy paints based on epoxy resins are most often used as a primer coating for metal. Two-component coatings based on polyurethane resins are characterized by high strength and durability, making them an optimal choice for vehicles operating in harsh conditions. The article also covers the latest and most advanced types of polymer coatings. There are quite a few polymer materials used for processing automotive body parts. The article also examines a new type of protective coatings based on synthetic components (liquid glass) and silicon (nanoceramics).

Key words: *mechanical engineering, transportation, rolling stock, gondola car body car body, protective coating, new materials, operation, reliability.*

Черненко П.В.

Національна академія Національної гвардії України

Бондар Є.В.

Національна академія Національної гвардії України

Круглов О.В.

Національна академія Національної гвардії України

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО СТВОРЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОБОЧОГО МІСЦЯ ОБЛІКУ МАТЕРІАЛЬНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ РЕМОНТУ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ

Стаття присвячена розробленню пропозицій щодо автоматизації процесів управління матеріально-технічними засобами автобронетанкової служби для проведення ремонту автобронетанкової техніки. З'ясовано, що перехід громадськості до інформаційних технологій (далі ІТ) та високих технологій вводить в обіг інформаційні ресурси та збільшує попит на професійні навички фахівців. Визначено, що жодна сфера діяльності не може тепер не лише без сервісних та виробничих технологій для виробництва продукції та послуг, а й без інформаційних технологій для управління інформацією, виробництва, закупівель, продажів, маркетингу та інших функціональних підрозділів підприємства, що стали необхідними інструментами управління.

Доведено, що інформаційні технології дозволяють ефективно управляти всіма типами ресурсів. Оскільки ресурси завжди обмежені, ключем до успіху є прийняття належних та своєчасних управлінських рішень у концентрації ресурсів для досягнення найсильнішого ефекту. Це забезпечується за рахунок відомостей, що надаються за допомогою інформаційних технологій, які дозволяють об'єднувати ресурси у потрібний час та у потрібному місці, щоб вирішити основні завдання та проблеми.

Доведено, що знання, організовані в систему, сприяють підвищенню компетентності співробітників та дозволяють їм працювати більш цілеспрямовано, найбільш ефективно та менш енерговитратною. У рамках ІТ-стратегії має бути формалізований підхід до розуміння системи, принципів та методів, на основі яких розвиватимуться всі елементи корпоративної інформаційно-керуючої системи (КІКС). Визначено, що організація інтегрованого процесу, який підтримує всі етапи роботи підприємства, спрямована на успішний розвиток бізнесу та є метою проекту з розробки ІТ-стратегії.

З'ясовано, що для досягнення цієї мети необхідно:

- вдосконалення системи управління;
- планування та впровадження інформаційних технологій;
- створення єдиного інформаційного простору підприємства;
- зниження сукупної вартості володіння інформаційними технологіями (закупівля, розробка, впровадження, навчання, підтримка).

Ключові слова: інформаційні технології, сучасні комп'ютерні технології, автоматизоване робоче місце, матеріально-технічні засоби автобронетанкової служби, ремонт автобронетанкової техніки.

Постановка проблеми. Так для сил охорони та оборони сектору безпеки України відсутні АСУ управління матеріально-технічним забезпеченням [3]. Запити на запасні частини та агрегати поступають централізовано. Ремонт автобронетанкової техніки в ППД проводиться за рахунок сторонніх організацій та автотранспортних підприємств. В польових умовах в рухомих ремонтних майстернях, або відправляється до ремонтних підприємств цивільного сектору. В той же час на складах військових частин можуть знаходитися запасні час-

тини які потрібні сусідньої частині. За рахунок запропонованого автоматизованого робочого місця обліку матеріально-технічних засобів автобронетанкової служби військ можливий обмін запасними частинами, списання залишків, полегшення обліку проведення технічного обслуговування і ремонту, все це в свою чергу підвищить сумарну ефективність застосування військ, як у повсякденній діяльності так і під час ведення бойової дій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Можливості сучасних комп'ютерних технологій

для автоматизації обробки інформації можуть підвищити продуктивність праці, збільшити ефективність управління документами та прискорити обмін управлінською інформацією. Концепція розподілених автоматизованих систем управління, яка спрямована на локальну обробку інформації, набула великого поширення в даний час. Це дозволяє організувати поділ управлінської праці персоналу автоматизації своїх функцій. Для реалізації цієї ідеї необхідно створити на кожному рівні управління та предметної області автоматизовані робочі місця на базі персональних комп'ютерів [1-2].

Постановка завдання. Метою статті є розроблення пропозицій щодо автоматизації процесів управління матеріально-технічними засобами автобронетанкової служби для проведення ремонту автобронетанкової техніки за допомогою мови UML в середовищі Rational Rose.

Виклад основного матеріалу. Можливості сучасних комп'ютерних технологій для автоматизації обробки інформації можуть підвищити продуктивність праці, ефективність керування документами та прискорити обмін керування інформацією.

На даний момент велике поширення має концепція розподілених автоматизованих систем керування, спрямованих на обробку інформації. Це дозволяє організувати поділ управління праці та персоналу для автоматизації своїх функцій. Для реалізації цієї ідеї необхідно створити кожної предметної області автоматизовані робочі місця з урахуванням персональних комп'ютерів.

Автоматизоване робоче місце – сукупність апаратних та програмних засобів, які знаходяться безпосередньо в робочому місці співробітника та призначені для автоматизації їх роботи за фахом.

Автоматизовані робочі місця мають проблеми професійної спрямованості в конкретній предметній галузі та є засобом зв'язку спеціаліста з автоматизованими інформаційними системами.

Автоматизоване робоче місце спеціаліста забезпечує:

- простота, зручність та дружнє ставлення до користувача;
- легка адаптація до конкретних функцій користувача;
- компактне розташування та низькі вимоги до умов праці;
- висока надійність та виживання;
- порівняно просту організацію технічного обслуговування;
- мобільність працівників;

– підвищення продуктивності.

Ефективним режимом роботи автоматизованого робочого місця є його функціонування у межах локальної обчислювальної мережі. Створені автоматизовані робочі місця фахівців дають можливість користувачеві працювати у діалоговому режимі, оперативно вирішувати поточні завдання, зручно вводити дані, вести контроль, обробку інформації, визначати достовірність результатної інформації, виводити та передавати каналами зв'язку. Інформаційне забезпечення автоматизованого робочого місця орієнтується на конкретну, звичну користувача, предметну сферу [1].

Автоматизовані робочі місця повинні бути встановлені відповідно до їхньої передбачуваної функціональності. Проте загальні принципи залишаються незмінними

- системність;
- гнучкість;
- стійкість;
- ефективність.

Під системністю варто розуміти наступне: робоча станція повинна бути системою взаємозалежних компонентів. Ця структура має чітко виконувати функції, до виконання яких створюється ця робоча станція.

Принцип гнучкості має першорядне значення у створенні сучасного та ефективного функціонування робочих місць. Цей принцип означає, що автоматизоване робоче місце може бути адаптоване до пропонованого оновлення програмного забезпечення та обладнання. В даний час швидкість старіння обладнання та програмного забезпечення продовжує зростати, дотримання цього правила стає однією з важливих умов для створення нових автоматизованих робочих місць. Для забезпечення принципу гнучкості у працюючих автоматизованих робочих місцях усі підсистеми окремо взятого автоматизованого робочого місця повинні виконуватися у вигляді окремих модулів, які легко замінити. Стандартизація всіх елементів потрібна для того, щоб при заміні модулів не виникало несумісності. Високе значення має принцип розвитку стійкості. Він полягає у виконанні функцій, закладених в автоматизоване робоче місце, незалежно від впливу зовнішніх факторів, так і внутрішніх. У разі виходу з ладу працездатність системи має швидко відновлюватися, а неполадки в окремих елементах мають якнайшвидше усунути.

Принцип ефективності означає, що вартість створення системи та експлуатації не повинні

перевищувати економічних вигід від її реалізації. Крім того, при створенні автоматизованого робочого місця має враховуватися, що його ефективність багато в чому буде залежить від адекватного поділу функцій та навантаження між робітниками та засобами обробки інформації, ядром якої є персональний комп'ютер. Тільки в таких умовах автоматизоване робоче місце стає не лише засобом підвищення продуктивності та ефективності управління, а також соціальної комфортності спеціалістів.

Діаграма варіантів використання (use case diagram) – діаграма, де зображуються відносини між акторами і варіантами використання.

Діаграма варіантів використання – це вихідне концептуальне уявлення чи концептуальна модель системи у процесі її проектування та розробки. Створення діаграми варіантів використання має:

- визначити межі та контекст модельованої предметної області на початкових етапах проектування системи;
- сформулювати загальні вимоги до функціонування проектованої системи;
- розробити вихідну концептуальну модель системи для її подальшої деталізації у формі логічних та фізичних моделей;
- підготувати початкову документацію для взаємодії розробників системи з її замовниками та користувачами.

Провівши кілька бесід із замовником, було вивчено та проаналізовано предметну область. Щоб уникнути невідповідностей і переконатися, що предметна область зрозуміла правильно, було побудовано діаграму use-case. Дана діаграма представлена на рис. 1.

Під час підвищення ефективності бізнес-процесів складського приміщення шляхом впровадження автоматизованого робочого місця було виявлено декілька потенційних проблем:

- бізнес-процеси не до кінця поставлені;
- бізнес-процеси змінюватимуться в найближчому майбутньому.

Таким чином, важливо вибрати інформаційну систему, яка дозволяє гнучко та безболісно вносити зміни до неї.

АРМ має виконувати такі функції:

- здійснювати пошук запчастини за заданими ключами: словами, що входять до назви товару, виробника, категорії продукту;
- виводити на монітор ПЕОМ інформацію, повну або часткову, про вибрані товари;
- формувати замовлення та видавати звітну документацію.

Вимоги до редагування бази даних:

- можливість редагування, використовуючи інтерфейс програми та за допомогою вбудованого програмного забезпечення;
- здійснення навігації за програмою за допомогою засобів позиціонування чи функціональних клавіш;
- обробка інформації може здійснюватись за допомогою клавіатури, буфера обміну, засобів позиціонування.

Вхідна запитна інформація:

- формування рахунок/фактура;
- запити, реалізовані за допомогою вбудованих SQL функцій;
- каталог товарів.

Для отримання звіту щодо наявного товару, або звіту про витрату товару необхідно забезпечити діалог із користувачем для введення коду товару. Така

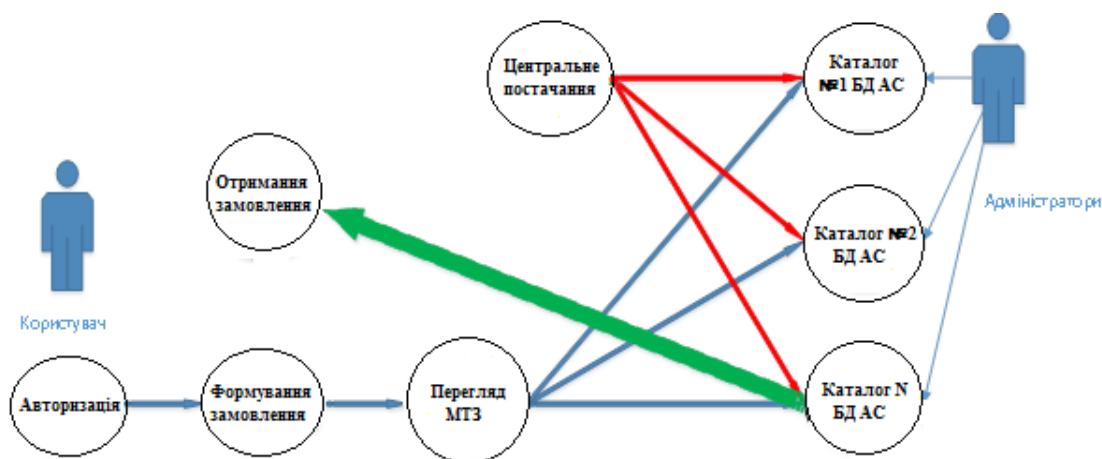


Рис. 1. Діаграма варіантів використання

інформація вводиться з клавіатури повідомлення запит на екрані в процесі вирішення завдання.

Вихідною інформацією для користувача є: звіт по залишках, що містить відомості про код товару, його найменування, одиницю виміру, ціну за одиницю.

Створення та відпрацювання АРМ повинні проводитися за такими основними етапами:

аналіз системи прийняття рішень; аналіз інформаційних вимог, визначення типу інформації; агрегування рішень; проектування моделі процесу; проектування об'єкта; виробництво.

Діаграма діяльності – UML-діаграма, де показано розкладання деякої діяльності її складові. Під діяльністю розуміється специфікація виконуваної поведінки у вигляді координованого послідовного та паралельного виконання підлеглих елементів – вкладених видів діяльності та окремих дій, з'єднаних між собою потоками, що йдуть від виходів одного вузла до входів іншого.

Діаграми діяльності використовуються при моделюванні бізнес-процесів, технологічних процесів, послідовних та паралельних обчислень. Діаграма діяльності представлена на рис. 2.

Контекстна діаграма – аналітична модель, яка описує абстрактну систему високого рівня.

Контекстна діаграма визначає зовнішні системи об'єкти, які взаємодіють із нею, але нічого не відображає внутрішньої структури чи поведінки системи.

Контекстна діаграма представлена на рис. 3.

На вході діють:

- інформація про запчастини;
- дані про покупця.

Керуючими є:

- ГОСТ;
- каталог товарів.

Ресурси, що виконують роботу (механізми):

- персонал.

Результатом діяльності магазину на виході є:

- рахунок-фактура.

До складу бізнес-процесу «Діяльність автобронетанкової служби» входять підпроцеси: вибір товарів; замовлення товару; видача товару.

Декомпозиція бізнес-процесу «Діяльність автобронетанкової служби» представлена на рис. 4.

Висновки. Автоматизація процесів управління на теперішній час є одним з важливіших процесів. Теорія автоматизації досить розвинута, але існують проблемні питання з практичною реалізацією. На рівні фінансування сил безпеки та

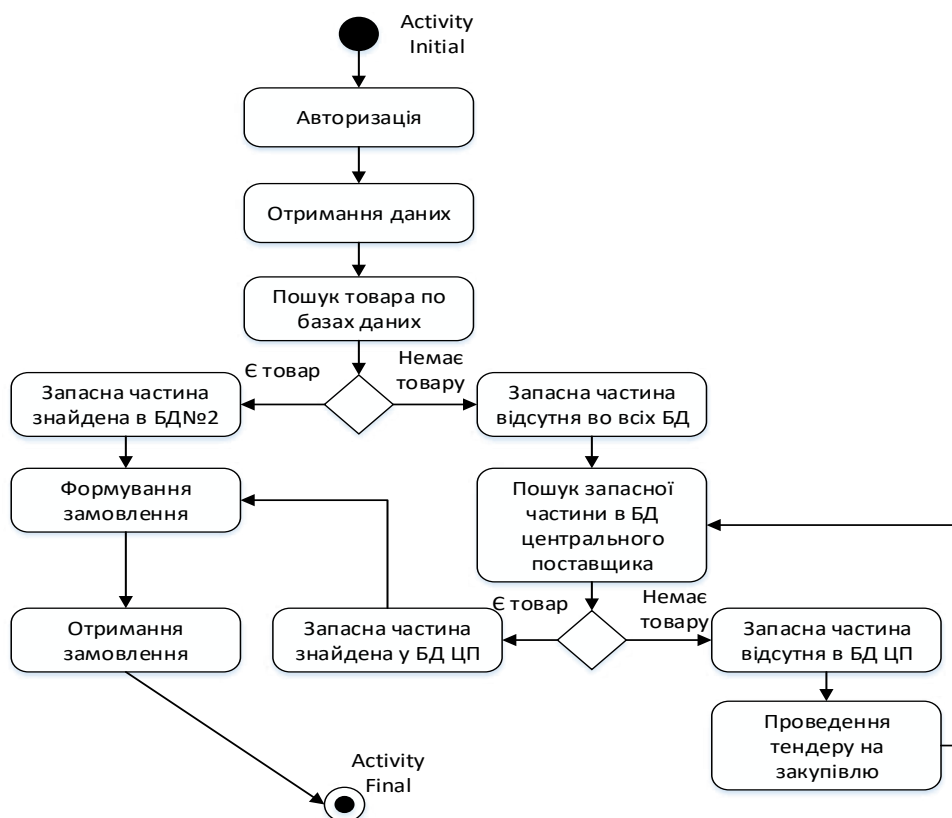


Рис. 2. Діаграма діяльності

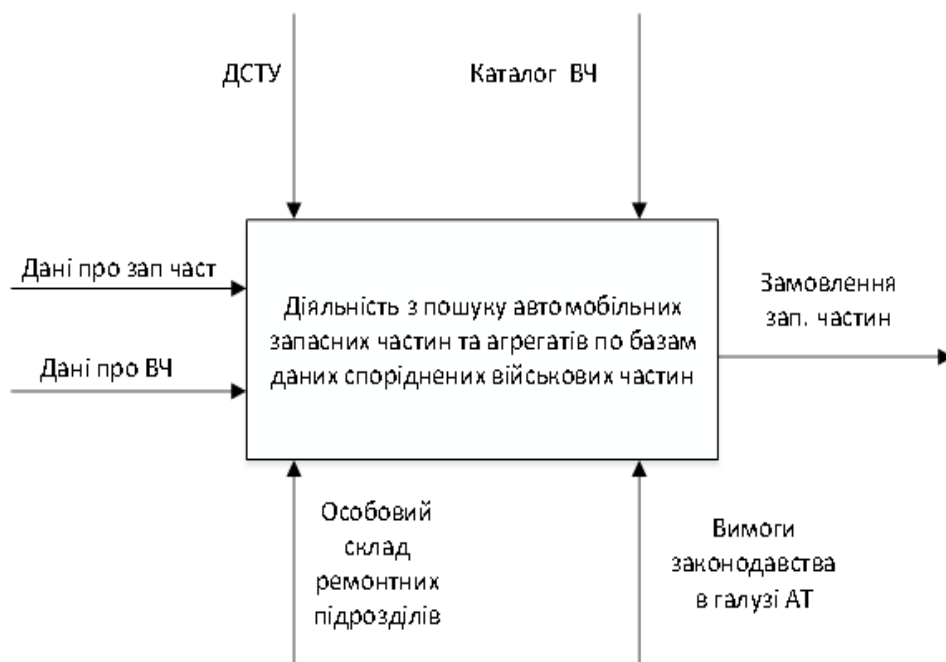


Рис. 3. Контекстна діаграма

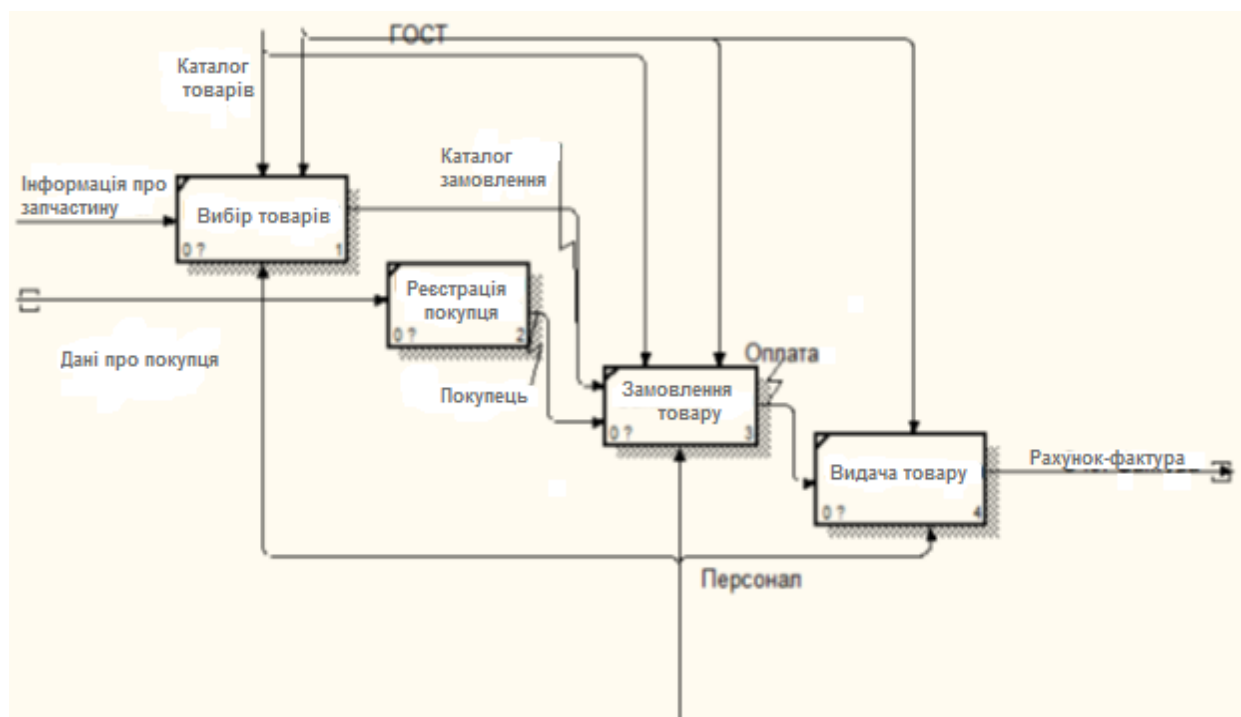


Рис. 4. Декомпозиція процесу «Діяльність автобронетанкової служби»

оборони сектору безпеки та оборони України, на рівні реалізації побудови систем автоматизації, на рівні навченості особового складу. Розподіл матеріально-технічних ресурсів в умовах військової агресії РФ, забезпечення військ потрібними засобами постає найбільш актуально.

На теперішній час забезпечення матеріально-технічними ресурсами проводиться централізо-

вано, або за допомогою сторонніх організацій (волонтерів). Основна ідея даної статті полягає у створенні пропозицій, щодо пошуку запасних частин для автобронетанкових служб військ не у «вертикальній» площині, а пошуку по «горизонталі». Тобто в одній військовій частині є потрібні запасні частини для другої військової частини. Створення єдиної бази даних для обліку матеріально-техніч-

них ресурсів для сил безпеки та оборони сектору безпеки та оборони України дозволить раціонально використовувати наявні ресурси, збільшити ступінь контролю та обліку за ресурсами.

Ідея створення такої бази даних не нова, в деяких провідних західних країнах вона вже реа-

лізована. На жаль в Україні автоматизація процесів управління знаходиться в деяких областях в початковому стані. Дослідження процесів автоматизації системи управління матеріально-технічними ресурсами сил оборони України потребує подальшого розвитку.

Список літератури:

1. Інформаційні комп'ютерні системи автомобільного транспорту: навчальний посібник / А.А. Кашканов, В.П. Кужель, О.Г. Грисюк Вінниця: ВНТУ, 2010 – 230 с.
2. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія / В. Д. Мигаль. Х.: Майдан, 2018. 262 с.
3. ЗАКОН УКРАЇНИ Про національну безпеку України <https://surl.li/ttvvwi>

Chernenko P.V., Bondar Ye.V., Kruglov O.V. PROPOSALS FOR CREATING AN AUTOMATED WORKPLACE FOR MATERIAL AND TECHNICAL ACCOUNTING TOOLS FOR THE REPAIR OF ARMORED TANK VEHICLES

The article is devoted to the development of proposals for automating the processes of managing material and technical means of the armored personnel carrier for the repair of armored personnel carriers. It was found that the transition of the public to information technologies (hereinafter IT) and high technologies introduces information resources into circulation and increases the demand for professional skills of specialists. It was determined that no field of activity can do now not only without service and production technologies for the production of products and services, but also without information technologies for information management, production, procurement, sales, marketing and other functional divisions of the enterprise, which have become necessary management tools. It has been proven that information technologies allow effective management of all types of resources. Since resources are always limited, the key to success is making appropriate and timely management decisions in concentrating resources to achieve the strongest effect. This is ensured by the information provided by information technology, which allows the pooling of resources at the right time and in the right place to solve the main tasks and problems. It has been proven that knowledge organized into a system contributes to increasing the competence of employees and allows them to work more purposefully, most efficiently and with less energy consumption. As part of the IT strategy, there should be a formalized approach to understanding the system, principles and methods on the basis of which all elements of the corporate information management system (CIM) will be developed. It was determined that the organization of an integrated process that supports all stages of the enterprise's work is aimed at successful business development and is the goal of the IT strategy development project.

It was found that in order to achieve this goal, it is necessary:

- *improvement of the management system;*
- *planning and implementation of information technologies;*
- *creation of a unified information space of the enterprise;*
- *reduction of the total cost of ownership of information technologies (purchase, development, implementation, training, support).*

Key words: *information technologies, modern computer technologies, automated workplace, material and technical means of the armored service, repair of armored vehicles.*

Шапенко Є.М.

Національний транспортний університет

Котова С.О.

Національний транспортний університет

Білоног О.В.

Національний транспортний університет

Ярошевський В.В.

Національний транспортний університет

РОЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ У РОЗВИТКУ МІСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ В УМОВАХ КОНЦЕПЦІЇ SMART CITY

Стаття присвячена дослідженню використання інтелектуальних транспортних систем (ІТС) у міській логістиці в контексті концепції Smart City. У статті розкрито основні проблеми, спричинені урбанізацією та постійним зростанням інтенсивності міських транспортних потоків, зокрема затори, високі витрати на транспортні перевезення, нерівномірний розподіл транспортних ресурсів і забруднення навколишнього середовища. Визначено, що використання інтелектуальних транспортних систем (ІТС) у міській логістиці в контексті концепції Smart City обумовлене збільшенням транспортного навантаження та необхідністю оптимізації управління міською інфраструктурою. Сучасні міста стикаються з такими викликами, як затори, забруднення навколишнього середовища, дисбаланс у використанні транспортних ресурсів і високі витрати на логістичні операції. ІТС є ключовим інструментом для інтеграції технологій, покращення управління перевезеннями, оптимізації транспортних маршрутів і забезпечення мобільності населення. З'ясовано, що їх впровадження сприяє підвищенню ефективності міських логістичних процесів, раціональному використанню ресурсів та створенню сталих транспортних систем, що відповідають принципам розумного міста. Головним завданням дослідження є аналіз можливостей впровадження інтелектуальних транспортних систем у міську логістику в контексті концепції Smart City, що сприятиме оптимізації управління транспортними потоками, зниженню витрат, покращенню мобільності населення та забезпеченню сталого розвитку міської інфраструктури. У статті обґрунтовано ефективність використання ІТС для підвищення продуктивності міських логістичних процесів і створення сталих транспортних систем, які відповідають принципам розумного міста. Інтелектуальні транспортні системи забезпечують оптимізацію управління перевезеннями, раціональне використання ресурсів та сприяють розвитку сталої міської інфраструктури. Їх інтеграція у концепцію Smart City дозволяє покращити ефективність міських транспортних систем та підвищити якість життя населення.

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи, пасажиропотоки, Smart City, розумні міста, логістика міста, урбанізація, мобільність, пасажирські перевезення.

Постановка проблеми. Сучасні міста стикаються з численними викликами, пов'язаними із зростанням кількості населення та інтенсивності руху транспорту. У таких умовах ключову роль у створенні комфортного, безпечного та екологічно чистого міського середовища відіграють інтелектуальні транспортні системи (ІТС). Вони стають невіддільною складовою концепції Smart City, сприяючи ефективному управлінню міською логістикою. Завдяки використанню новіт-

ніх інформаційних технологій, ІТС трансформують транспортну інфраструктуру, підвищуючи її ефективність, знижуючи негативний вплив на довкілля та створюючи нові можливості для інтеграції транспортних послуг.

Урбанізація та стрімке зростання транспортних потоків у містах значно ускладнюють функціонування міської логістики, створюючи низку нагальних проблем. Затори, дисбаланс у використанні транспортних ресурсів, забруднення навко-

лишнього середовища та високі витрати на логістичні операції перешкоджають забезпеченню ефективного перевезення пасажирів і вантажів. Традиційні методи управління транспортною інфраструктурою вже не відповідають сучасним вимогам міського розвитку, що зумовлює необхідність впровадження нових технологічних рішень.

В умовах концепції Smart City, яка передбачає інтеграцію цифрових технологій у різні аспекти міського життя, інтелектуальні транспортні системи стають невід'ємним інструментом вирішення цих проблем. Використання ІТС дозволяє оптимізувати управління перевезеннями, підвищувати мобільність населення, скорочувати витрати ресурсів і зменшувати негативний вплив транспорту на довкілля.

Отже, постає проблема необхідності глибокого дослідження можливостей впровадження ІТС у міські логістичні процеси та оцінки їх впливу на сталий розвиток міської інфраструктури в рамках концепції Smart City. Це дозволить запропонувати оптимальні шляхи модернізації транспортної системи міста, що сприятимуть покращенню якості життя мешканців та забезпеченню стійкості транспортних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні [1, стр. 5] розглядається вплив сучасної транспортної інфраструктури на розвиток регіонів у країнах Центральної та Східної Європи. Автори пропонують концепцію динамічної просторової послідовності, яка інтегрує інвестиції в транспортну інфраструктуру з процесами регіонального та міського розвитку.

Науковці [2, стр. 6] розробили інтелектуальну транспортну систему, яка базується на веб-геопросторовій інформаційній платформі та використовує переваги Інтернету. Ця система поєднує традиційні методи збору динамічних даних із використанням апаратних модулів. Додатково інтелектуальна транспортна система була інтегрована з технологіями інтелектуальних технологій та Інтернету речей [3, стр. 12], гібридними хмарними рішеннями та соціальними мережами, застосовуючи підхід нечіткої логіки [4, стр. 4]. У роботах [5, стр. 3] також обговорюються обмеження використання великих даних у міському плануванні та розробці політики, що вимагає активної співпраці між різними зацікавленими сторонами [6, стр. 4].

Науковці [7, стр. 80] проаналізували наявні дослідження, що стосуються застосувань Інтернету речей (IoT). Їхні роботи охоплюють такі сфери, як охорона здоров'я, логістика харчових

продуктів, мінеральна та переробна промисловість, моніторинг транспортних засобів, управління будівлями та інфраструктурою, а також реагування на надзвичайні ситуації.

Цей огляд демонструє міждисциплінарний характер інтелектуальних транспортних систем, а також їхнє значення для оптимізації міської логістики та розвитку концепції Smart City.

Постановка завдання. Дослідження умов розвитку міської логістики в рамках концепції «Smart City» з акцентом на важливості застосування ІТС, як результат – забезпечення сталого розвитку, оптимізація управлінських процесів і підвищення рівня життя мешканців міст.

Виклад основного матеріалу. Сучасні міста щоденно стикаються із низкою складних викликів, які потребують балансу між соціальною привабливістю та комфортом проживання мешканців, динамічним розвитком виробництва та дотриманням екологічних стандартів, інтеграцією транспортної й виробничої інфраструктури з сучасними інформаційними технологіями. У цьому контексті міста виступають не лише економічними центрами, а й платформами для впровадження соціальних та технологічних інновацій, а також осередками освіти, культури та суспільного прогресу.

Рівень автомобілізації міст вважається один з найважливіших показників добробуту, оскільки чим вище рівень добробуту населення, тим більша імовірність придбання автомобіля.

Концепція Smart City, яка базується на використанні інтелектуальних технологій, сприяє переосмисленню традиційних функцій міста. Ці технології забезпечують вирішення актуальних проблем, оптимізують міське управління та створюють умови для розвитку як окремих громадян, так і міста загалом. Інноваційні підходи до управління сприяють зростанню інвестиційної привабливості міст, підвищенню ефективності використання ресурсів, створенню нових бізнес-напрямків і покращенню якості життя громадян.

Використання інтелектуальних транспортних систем (ІТС) є ключовим елементом у реалізації концепції Smart City, оскільки вони забезпечують ефективне управління міською мобільністю, інтеграцію різних видів транспорту та зниження негативного впливу транспорту на екологію. ІТС включають у себе комплекс технологій, спрямованих на автоматизацію та оптимізацію транспортних процесів, таких як управління дорожнім рухом, моніторинг трафіку, планування маршру-

тів, а також створення безпечного й комфортного середовища для учасників дорожнього руху.

Діапазон впливу інтелектуальних транспортних систем можна поділити [1, стр. 6] на три категорії (рисунок 1):

У рамках концепції Smart City інтелектуальні транспортні системи сприяють наступному:

- підвищення безпеки дорожнього руху стає можливим з використанням сенсорів, камер і систем автоматичного сповіщення дозволяє знижувати кількість аварій та оперативно реагувати на надзвичайні ситуації;
- оптимізація трафіку за рахунок використання алгоритмів для аналізу даних у реальному часі забезпечують адаптивне регулювання світлофорів, мінімізуючи затори та скорочуючи час у дорозі;
- розвиток громадського транспорту – ІТС підтримують інтеграцію громадського транспорту в загальну систему міської мобільності, забезпечуючи точне планування маршрутів, прогнозування часу прибуття та комфорт для пасажирів;
- зниження впливу на екологію можливе завдяки ефективнішому використанню ресурсів та зменшенню викидів CO₂, ІТС допомагають містам рухатися до цілей сталого розвитку.
- підтримка інновацій, оскільки інтелектуальні системи сприяють розвитку автономного транспорту, впровадженню електромобілів та інтеграції з відновлюваними джерелами енергії.

Дослідження [2, стр. 3] стверджує, що застосування ІТС забезпечує такі позитивні результати, як:

- збільшення пропускної спроможності вуличної мережі на 20–25%;
- скорочення кількості ДТП на 40–80%;
- зниження часу в дорозі та енергоспоживання на 45–70%;

- покращення екологічних показників (зменшення викидів на 30–50%);
- підвищення комфорту подорожей для всіх учасників дорожнього руху.

Загалом, ІТС є основою для створення розумної мобільності, яка поєднує технології, екологічність і комфорт, забезпечуючи високий рівень якості життя в сучасних містах.

Розвиток сучасних технологій у сфері управління розвитком міст стає важливим чинником для забезпечення сталого економічного розвитку, формування нових можливостей для інвесторів і підвищення конкурентоспроможності міст на глобальному рівні. Інтеграція розумних систем у міське середовище дозволяє трансформувати ключові процеси життєдіяльності, сприяє впровадженню інноваційних підходів до управління, а також створює умови для сталого розвитку громад та комфортного проживання населення.

Ця тема набуває особливої актуальності для України, оскільки процес впровадження концепції Smart City в українських містах розпочався відносно недавно. У контексті глобалізації та інтеграції, які активно впливають на розвиток сучасного світу, система Smart City вже стала ключовим елементом трансформації міського середовища в країнах з розвиненими економіками та у державах Європейського Союзу.

Концепція Smart City відіграє важливу роль у всебічному розвитку міської інфраструктури та суспільного життя. Вона впливає не лише на повсякденний побут громадян, але й сприяє модернізації систем державного та місцевого управління, покращенню громадської безпеки, підвищенню ефективності роботи промисловості, транспорту, охорони здоров'я, енергетики, а також вирішенню екологічних викликів. Ці трансфор-

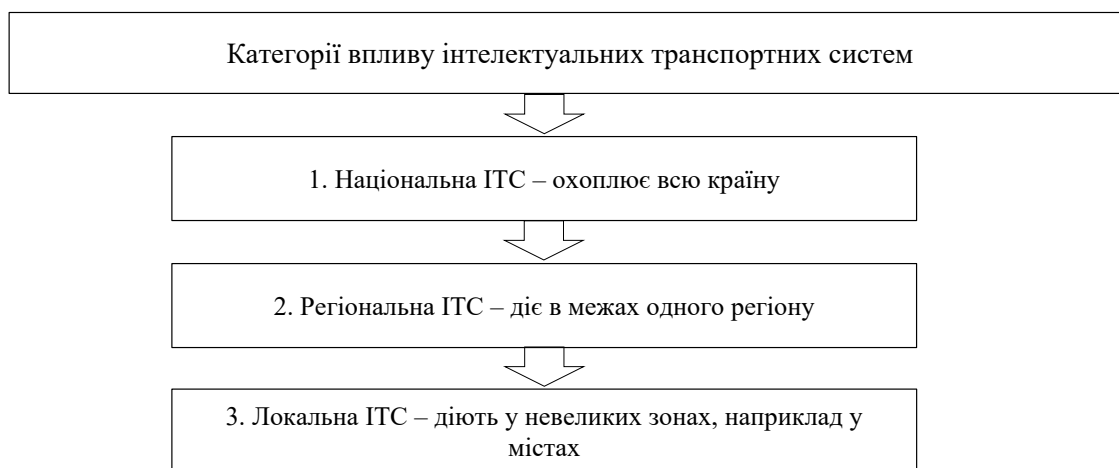


Рис. 1. Категорії впливу інтелектуальних транспортних систем

мації відчутно змінюють якість життя громадян як на локальному, так і на національному рівнях, забезпечуючи інтеграцію інноваційних рішень у ключові аспекти життєдіяльності.

Сьогодні концепція «Smart City» сприймається як цілісний підхід до інтеграції інформаційних і комунікаційних технологій для управління міською інфраструктурою та її моніторингу. Мета цього підходу полягає у покращенні якості життя мешканців шляхом підвищення комфорту, безпеки, ефективності послуг і раціоналізації витрат на використання ресурсів. Smart City спрямоване на модернізацію міської інфраструктури, що відкриває нові можливості для муніципального управління, надання сучасних послуг та забезпечення безпеки.

Інфраструктура Smart City охоплює широкий спектр інновацій, які впроваджуються завдяки інтелектуальним технологіям:

- альтернативні способи енергозабезпечення та водопостачання;
- сучасні системи сортування та переробки відходів;
- використання немоторизованого транспорту;
- створення широкої мережі відеоспостереження та відеоаналітики;
- контроль якості повітря.

На основі застосування ІТС концепція Smart City об'єднує датчики, системи освітлення, лічильники та відеокамери, які забезпечують високий рівень якості логістичних послуг. Додатково, використання сенсорів і моніторингових

систем сприяє підвищенню безпеки за рахунок ефективного збору та аналізу даних.

Дослідники [5, стр. 2] розглядають Smart City як модель майбутнього, яка змінює стандарти життя, спрощує щоденні справи мешканців та допомагає ефективніше використовувати час. У цифрову епоху трансформація розумного міста розпочинається з модернізації управлінських підходів і запровадження інтелектуальних рішень, що включає:

- перебудову бізнес-моделей і створення нових цінностей у міському середовищі;
- впровадження інструментів для підвищення ефективності використання ресурсів;
- залучення інвестицій для вдосконалення цифрових технологій та інформаційно-комунікаційних систем.

Основними характеристиками Smart City є технологічна інфраструктура, ефективне управління ресурсами, орієнтація на економічну доцільність і сервісність міського середовища, комфортне й безпечне життя, а також акцент на людині. Реалізація цих принципів забезпечується активним використанням сучасних цифрових і технічних рішень у сфері ІТС.

Згідно з європейською концепцією «Smart City», вітчизняні вчені пропонують визначати «розумні міста» за шістьма ключовими характеристиками, які відповідають класичним теоріям розвитку урбаністичних територій. Ці характеристики базуються на принципах регіональної конкурентоспроможності, використанні транспортних



Рис. 2. Основні характеристики Smart City



Рис. 3. Перелік послуг ІТС в рамках концепції Smart City

і інформаційно-комунікаційних технологій, ефективному управлінні економікою та природними ресурсами, розвитку людського і соціального капіталу, покращенні якості життя та залученні громадян до управління містом.

Ці складові забезпечують комплексний підхід до створення міста, орієнтованого на сталий розвиток, комфорт, безпеку та активну взаємодію мешканців із владою.

Сучасний стан ринку інтелектуальних транспортних систем у містах характеризується наступними особливостями:

- відсутність загальнодержавних стандартів;
- розгалуженість та фрагментарність систем;
- недостатньо розвинуті й нестабільні зв'язки з міжнародними асоціаціями у цій сфері.

Розробка й запровадження українських інтелектуальних транспортних систем сприятиме підвищенню ефективності управління перевезеннями, зниженню витрат на транспортування пасажирів і вантажів, а також стимулюватиме розвиток національної транспортно-комунікаційної та інформаційно-економічної інфраструктури.

Розглянемо більш детально послуги, що пропонуються ІТС (рисунок 3) та можуть надаватися користувачам у містах:

Головною метою використання даних послуг користувачами пасажирських та вантажних перевезень в містах є отримання актуальної інформації в режимі реального часу для підвищення ефективності, продуктивності та зменшення шкідливого впливу на екологічну ситуацію в містах.

Висновки. Методологія, представлена у статті, ґрунтується на дослідженні розвитку міської логістики в рамках концепції «Smart City» з акцентом на важливості застосування ІТС.

Впровадження інтелектуальних транспортних систем у міському управлінні як вантажними, так і пасажирськими перевезеннями відкриває можливості для вирішення нагальних проблем, таких як оптимізація використання ресурсів, забезпечення громадської безпеки та зменшення негативного впливу на довкілля. В умовах обмежених ресурсів і потреби у швидкому відновленні, впровадження «розумних» рішень стає життєво необхідним.

Дослідження і впровадження ІТС у міській логістиці є не лише теоретичною необхідністю, але й практичним кроком до сталого розвитку українських міст. Це сприятиме формуванню інноваційної інфраструктури, яка забезпечить краще майбутнє для мешканців.

Список літератури:

1. Komornicki, Tomasz, and Sławomir Goliszek. New Transport Infrastructure and Regional Development of Central and Eastern Europe. *Sustainability* 2023. Vol. 15 (6). P.1-24. DOI:10.3390/su15065263
2. Yusoff, Nik & Shafri, Helmi & Muniandy, Ratnasamy. An effective road management system using web-based GIS software. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2014. Vol. 20. P.1-8. DOI:10.1088/1755-1315/20/1/012025

3. Nayak J. et al. Intelligent Computing in IoT-Enabled Smart Cities: A Systematic Review. In: Sharma, R., Mishra, M., Nayak, J., Naik, B., Pelusi, D. (eds) *Green Technology for Smart City and Society. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. Vol. 151. P. 1-21. DOI:10.1007/978-981-15-8218-9_1
4. K. Iqbal, M. A. Khan, S. Abbas, Z. Hasan, and A. Fatima. Intelligent transportation system (ITS) for smart-cities using Mamdani fuzzy inference system,” *Int. J. Adv. Comput. Sci.* 2018. Vol. 9 (2) DOI:10.14569/IJACSA.2018.090215
5. J. Kandt and M. Batty. Smart cities, big data and urban policy: Towards urban analytics for the long run. *Cities*. 2021. Vol. 109 (1). DOI:10.1016/j.cities.2020.102992
6. Razmjoo, A., Østergaard, P. A., Denäi, M., Nezhad, M. M., & Mirjalili, S. *Effective policies to overcome barriers in the development of smart cities. Energy Research & Social Science*. 2021. Vol. 79. DOI:10.1016/j.erss.2021.102175
7. M. Thibaud, H. Chi, W. Zhou, and S. Piramuthu. Internet of things (IoT) in high-risk environment, health and safety (EHS) industries: A comprehensive review. *Decision Support Systems*. 2018. Vol. 108. P. 79-95. DOI:10.1016/j.dss.2018.02.005

Shapenko Ye.M., Kotova S.O., Bilonoh O.V., Yaroshevskyy V.V. THE ROLE OF INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS IN THE DEVELOPMENT OF URBAN LOGISTICS UNDER THE SMART CITY CONCEPT

The article is devoted to the study of the use of Intelligent Transportation Systems (ITS) in urban logistics within the framework of the Smart City concept. It highlights the key challenges caused by urbanization and the continuous increase in urban traffic intensity, including congestion, high transportation costs, uneven distribution of transport resources, and environmental pollution.

It has been established that the implementation of Intelligent Transportation Systems (ITS) in urban logistics, in the context of the Smart City concept, is driven by the growing transportation load and the need to optimize urban infrastructure management. Modern cities face challenges such as congestion, environmental pollution, an imbalance in transport resource utilization, and high logistics costs. ITS serves as a crucial tool for integrating technologies, improving transport management, optimizing routes, and ensuring population mobility. The study finds that the adoption of ITS enhances the efficiency of urban logistics processes, promotes rational resource utilization, and contributes to the development of sustainable transportation systems aligned with the principles of a Smart City. The main objective of the research is to analyze the opportunities for implementing Intelligent Transportation Systems in urban logistics within the Smart City framework, which would facilitate the optimization of traffic management, cost reduction, improved mobility, and the sustainable development of urban infrastructure. The article substantiates the effectiveness of ITS in improving the productivity of urban logistics processes and creating sustainable transportation systems that align with Smart City principles. Intelligent Transportation Systems ensure optimized transport management, efficient resource use, and contribute to the development of a sustainable urban infrastructure. Their integration into the Smart City concept allows for increased efficiency of urban transport systems and an improved quality of life for the population.

Key words: intelligent transportation systems, passenger flows, Smart City, smart cities, urban logistics, urbanization, mobility, passenger transportation.

УДК 656.61.052:004.9]:377.44+656.61.08
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/55>

Шевченко А.П.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Якусевич Ю.Г.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Дорофєєва З.Я.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Тришин В.В.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ПІДГОТОВКИ МОРЯКІВ НА ТЛІ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

Метою роботи є виявлення взаємного впливу діючих стандартів з підготовки фахівців морської галузі та впровадження нових інформаційних технологій на судні на стан безпеки судноплавства. Поставлена мета досягається шляхом з'ясування ролі координації та стандартизації на безпеку судноплавства та рівень підготовки судноводіїв; аналізу регуляторних викликів електронній навігації; вивчення вимог до навчання моряків е-навігації. Доведено, що чисельні діючі регуляторні вимоги і стандарти певним чином перешкоджають підвищенню безпеки судноплавства за рахунок впровадження нових інформаційних технологій, що негативно впливає на рівень інвестицій у навігаційні технології взагалі. Підкреслено, що з юридичної і технічної точки зору надходження додаткової навігаційної інформації до навігаційних систем судна не зменшує відповідальності судноводія, що виникає внаслідок навігаційних помилок. Судновласник може відповідати лише за вибір і реалізацію способу надходження інформаційних потоків на судно. Обґрунтовано, що майбутній розвиток морських навігаційних систем гальмуватиметься через відсутність стандартизації на борту і на березі, несумісність між суднами і підвищений і непотрібний рівень складності інформації. Показано парадокс, викликаний тим, що регуляторні механізми ІМО, розроблені для впровадження мінімальних стандартів для всіх суден, перешкоджають скорішому втіленню новітніх розробок. Новітні інформаційні технології, крокуючи попереду реалізованих стандартів, не можуть оптимальним способом використати додаткову інформацію за формою та змістом. Підкреслено, що правильне використання додаткової навігаційної інформації може покращити ситуаційну обізнаність судноводія, але й стати джерелом складних проблем. Відмічено, що координація та стандартизація при впровадженні сучасних інформаційних технологій, яка дозволить підвищити безпеку судноплавства, впливає на рівень підготовки судноводіїв. Отже, виникає необхідність навчання судноводія нової функціональності. Показано про односторонність підвищення кваліфікації моряків щодо їх знань, умінь та навичок роботи з електронними засобами та порядку використання електронної інформації та необхідність своєчасної модернізації відповідних стандартів.

Ключові слова: стандарти підготовки моряків, морський транспорт, судно, інформаційна технологія, навігаційна система, безпека судноплавства.

Постановка проблеми. Сучасні реалії в економіці взагалі і в морській галузі, зокрема, потребують фундаментальних змін у системі підготовки моряків, їх безконфліктної інтеграції в світову морську інфраструктуру. Дані вимоги лише посилюються

у зв'язку із впровадженням сучасних інформаційних технологій (ІТ) на судно взагалі та на місток, зокрема, та залученням нових потоків інформації у навігаційні системи для забезпечення постійного зростання рівня безпеки судноплавства.

Але на шляху більш інтенсивного впровадження нових ІТ стоять чисельні чинні регуляторні вимоги та діючі стандарти. І тут не все так однозначно. Це не означає, що на шляху науково-технічного прогресу стоять замшілі ретрогради. Але й необґрунтоване гальмування розвитку навігаційних технологій на основі сучасних ІТ негативно впливає на вкладання інвестицій у такі проекти. Проблеми є набагато глибшими, а істина, як і у переважній більшості випадків, знаходиться десь посередині. Тому виявити ці вузькі місця у підготовці моряків в умовах бурхливого розвитку інформаційних технологій, зберегти та удосконалити систему підготовки кадрів, дослідити питання стандартизації та регуляторної політики у цій сфері вважається за складне та актуальне наукове завдання. Крім того, особливого блиску ці питання набувають у зв'язку з необхідністю їх комплексного вирішення для підвищення безпеки судноплавства взагалі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Морська галузь завжди виступала передовим загоном науково-технічного прогресу, а морські судна постійно оновлюються сучасним технічним обладнанням, побудованим з використанням нових ІТ. Даний аспект також передбачає кропітку роботу щодо поліпшення якості фахової підготовки морських фахівців, формування у них необхідних компетенцій.

Ідеї компетентнісного навчання моряків широко розкриті у працях Н. Бібік, Л.В. Ващенко, Е.Ф. Зеєра, В.В. Краєвського, О.В. Овчарука, О.І. Пометун, А.В. Хуторського, О.В. Шестопалюка та багатьох інших дослідників.

Роблячи акцент на педагогічні аспекти вирішення цієї проблеми, на невизначеність концептуального та інноваційного потенціалу компетентнісного підходу [1], на психолого-педагогічні концепції діяльній та розвивальній системи спрямованості [2] тощо, автори поза полем зору залишають питання взаємного впливу впровадження нових інформаційних потоків у навігаційне обладнання суден і діючих стандартів підготовки, закріплених у базових керівних документах Міжнародної морської організації (ІМО).

Набуття необхідних компетенцій пов'язане з особистісним діяльнісним підходом до навчання, потребує трансформації змісту навчання шляхом використання принципово інших принципів відбору й структурування інформації та спрямоване на кінцевий результат навчання [3].

Компетенції виступають ключовим аспектом в оцінці кваліфікації (компетентності) фахівця.

Базуючись на визначених стандартах, компетентнісний підхід вимагає переходу від оцінювання знань до оцінювання компетенцій фахівця [4].

На думку деяких дослідників, в умовах професійного зростання сфера компетенцій фахівця морської галузі постійно зростає [5]. Причому часто спостерігається, що частка освітніх компетенцій знижується, а частка професійних компетенцій збільшується [6].

Усі фахівці міжнародного торговельного флоту відповідатимуть жорстким вимогам ІМО. Ці вимоги викладено у міжнародному кодексі з дипломування моряків та несення вахти (ПДНВ), в основі якого лежить багаторівнева підготовка морських спеціалістів на основі компетентнісного підходу [7]. Тому необхідно дослідити взаємозв'язок та вплив один на одного чинних стандартів і впровадження сучасних ІТ з погляду їхнього сумісного впливу на безпеку судноплавства.

Постановка завдання. Метою статті є виявлення взаємного впливу діючих стандартів з підготовки фахівців морської галузі та впровадження нових інформаційних технологій на судні на стан безпеки судноплавства.

Досягнення мети передбачає розв'язання таких завдань:

- з'ясування ролі координації та стандартизації на безпеку судноплавства та рівень підготовки судоводіїв;
- аналіз регуляторних викликів електронній навігації;
- вивчення вимог до навчання моряків е-навігації.

Виклад основного матеріалу. Стрімкий розвиток інформаційних технологій не залишив осторонь і морську галузь. Новітні ІТ бурхливо увірвалися у повсякденне життя судноплавних компаній, створивши масу додаткових приємних бонусів в організації повсякденного життя, планування, роботи порту, електронної навігації та ін. Але інформаційні технології, поряд зі значним підвищенням безпеки судноплавства і продуктивності праці окремих працівників, колективів та компаній взагалі, створюють і певні проблеми, яких, звісно ж, не було до їх впровадження. Так, електронна навігація (е-навігація), в якій широким фронтом втілюються найсучасніші досягнення сьогоденного інформаційного середовища, створює неабиякі виклики для судноплавства.

Завжди будь-які новації на флоті проводяться з головною метою – підвищення безпеки судноплавства. Це стосується й інформаційних техно-

логій, особливо їх використання на містку. Про це свідчать і хороша морська практика, і багато судових рішень, і аналіз правових норм Міжнародних правил запобігання зіткненню суден у морі (COLREGS).

Разом з тим підвищенню безпеки судноплавства за рахунок впровадження нових ІТ перешкоджають чисельні чинні регуляторні вимоги та діючі стандарти. Це стосується не лише впровадження нових інформаційних технологій на містку, мова йде про відкриття та залучення для підвищення безпеки судноплавства нових інформаційних потоків у навігаційні системи. Гальмування цих процесів негативно впливають на часткові показники та усувають стимули для інвестицій у навігаційні технології взагалі.

За навігаційні помилки завжди відповідає екіпаж. Навігаційні системи та інформаційні потоки навігаційної інформації – це лише засіб щодо забезпечення екіпажу всім необхідним для забезпечення безпеки судноплавства. Причому із юридичної, і з технічної точки зору питання надходження додаткової навігаційної інформації до навігаційних систем судна не зменшують відповідальності, що виникає внаслідок навігаційних помилок. Судновласник, відповідно до Конвенції про цивільну відповідальність (КЦВ) 1992 року, може відповідати лише за вибір і реалізацію способу надходження інформаційних потоків на судно.

Таким чином, з точки зору стандартизації необхідно дослідити правове підґрунтя термінів «навігаційна система як засіб навігації» або «навігаційна система як допоміжний засіб для навігації» та провести чітку лінію розмежування між цими двома термінами.

У сучасному інформаційному світі якісна зміна виконання навігаційних завдань залежить від обсягу та глибини впровадження відповідних інформаційних технологій. Причому мова йде у першу чергу не просто про автоматизацію окремих завдань або етапів процесу навігації, питання стоїть глобальніше: розвиток додаткових та альтернативних методів виконання навігаційних завдань.

Сучасні ІТ укріплюють зв'язок між судном та берегом, що дозволяє планувати й оптимізувати маршрути, визначати порядок проведення технічного обслуговування та ремонту суден, оптимізувати експлуатаційні аспекти для кожного рейсу та заходу в порт та ін. Використання лише частини інформації, що може бути надана портами та органами влади, яка стосується знання запла-

нованих маршрутів і пунктів призначення інших суден, що знаходяться у тому ж районі, зменшить невизначеність щодо обізнаності судноводіїв про обстановку у певному районі. Зменшення, а як максимум усунення невизначеності, допоможе судноводію спрогнозувати й уникнути ситуацій, що створюють ризики зіткнення [8].

Одним з самих ефективних засобів зменшення кількості зіткнень є використання радарів. А грамотне використання наданої радаром інформації відобразиться на майбутніх реакціях інших суден. Іншими словами, інформаційні технології, використовувані для зв'язку, можуть зменшити невизначеність щодо майбутніх рухів інших суден. У цьому є їх відмінність від ІТ, що просто забезпечують ситуативну обізнаність судноводія. Але досвід, отриманий від впровадження радарів, супутникових навігаційних систем, інформаційних систем відображення електронних карт (ECDIS) і автоматичних ідентифікаційних систем (AIS), виявив проблеми, пов'язані з людським фактором [9], неправильним плануванням [10] і надмірним покладанням на технології [11]. А ці проблеми трансформувалися у стійке небажання впроваджувати інформаційні технології на містках.

Тому ІМО не дарма б'є тривогу про те, що «якщо нинішній технологічний прогрес продовжуватиметься без належної координації, існує ризик, що майбутній розвиток морських навігаційних систем буде гальмуватися через відсутність стандартизації на борту і на березі, несумісність між суднами і підвищений і непотрібний рівень складності» [12].

Міжнародна морська організація приділяє постійну увагу впровадженню самих сміливих ІТ у сферу діяльності своєї організації. Особливо це стосується розвитку та впровадження електронної навігації, під якою мається на увазі «гармонізований збір, інтеграція, обмін, представлення та аналіз морської інформації на борту і на березі за допомогою електронних засобів з метою покращення навігації від причалу до причалу та пов'язаних з нею послуг для забезпечення безпеки на морі та захисту морського середовища. Е-навігація призначена для задоволення теперішніх і майбутніх потреб користувачів шляхом гармонізації морських навігаційних систем та допоміжних берегових служб» [12].

Дані в необробленому вигляді, які використовуються у різноманітних програмних додатках, завжди є занадто складними для безпосереднього використання людиною. Це стосується також

е-навігації, де, як і в інших ІТ, необхідно застосовувати правильний загальний підхід. Користь від даних буде тільки у тому разі, коли вони будуть належним чином оброблені відповідним програмно-апаратним комплексом, інтерпретовані і надані у стандартизованому форматі у зрозумілій формі судноводієві, щоб уникнути необхідності перенавчання для кожного окремого інструменту. Однак, на теперішній час на судах змонтовано обладнання різних виробників, яке часто не поєднується одне з одним.

Крім сумісності обладнання, є ще одна цікава проблема, що стосується ускладнення інформації. Ускладнення інформації заради самої себе та безпідставного ускладнення алгоритмів обробки інформації, складності апаратури та нееквівалентного зростання (якщо воно є) ефективності системи взагалі, є тупиковою гілкою розвитку системи. Ускладнення інформації не обов'язково має призводити до ускладнення способів навігації. Єдиною необговорюваною метою ускладнення інформації може бути лише безпечніша та ефективніша навігація.

Таким чином, необхідність координації та стандартизації у галузі впровадження сучасних ІТ дозволить краще вирішувати проблеми судноплавної галузі, де кожне судно є достатньо великою інвестицією, і будь-яка додаткова модернізація або вдосконалення може призвести до того, що ці інвестиції стануть непродуктивними.

Але координація та стандартизація, яка, з одного боку, очікує підвищення безпеки судноплавства, а з іншого, рівня підготовки судноводіїв, має два негативних наслідки.

По-перше, загальна координація та стандартизація суттєво затримує впровадження кращих, безпечніших і ефективніших ІТ на містку судна. Це викликано тим, що регуляторні механізми ІМО розроблені для впровадження мінімальних стандартів для всіх суден. І ці мінімальні стандарти перешкоджають скорішому втіленню новітніх розробок.

По-друге, бажання компаній інвестувати новітні технології та найскоріше впровадити їх в експлуатацію стикаються з неможливістю скористатися перевагами цих інновацій. Це пояснюється тим, що швидке вдосконалення ІТ крокує попереду реалізованих стандартів. Останні, не маючи оптимального способу використання додаткової інформації за формою та змістом, просто стримують розвиток інформаційних технологій.

Якщо до вказаних думок додати стійке несприйняття новацій, створене нещасними

випадками, пов'язаними з впровадженням технологій у минулому, то картина становиться зовсім сірою.

Отже, потребують роз'яснення й однозначного тлумачення важливі регуляторні питання та питання відповідальності, що турбують власників і операторів суден. І вказаний вище документ вперше розглядає ці два правові питання у взаємному зв'язку. Тобто мова йде про регуляторні заходи, яких необхідно дотримуватися для впровадження нових інформаційних потоків на містку, з одного боку. З іншого боку, є питання відповідальності, пов'язаної з використанням цих інформаційних потоків на містку, та зв'язку цієї відповідальності зі способом надання даних на судно.

Безпека судноплавства – це безупинний багатогранний процес підвищення визначених показників. Щось, що вчора здавалося немислимим, сьогодні стає звичайною повсякденністю. Так, використання нових навігаційних комплексів, систем і приладів, якісно новий рівень підготовки судноводіїв, управління безпекою за рахунок вдосконалення схем розділення руху та роботи берегових диспетчерських центрів призвели до значного покращення ситуаційної обізнаності і, як наслідок, безпека судноплавства взагалі.

Правильне використання додаткової навігаційної інформації може ще більше покращити ситуаційну обізнаність судноводія, але може стати й джерелом дуже складних, а часто і невирішуваних проблем.

Шляхи надходження інформації на судно є різними. Припустимо, що джерелом інформації є один ексклюзивний постачальник.

У першому випадку інформацію надає національний або міжнародний орган влади. Тобто у системі управління морським рухом існує центр управління рухом, який надає точну і корисну інформацію споживачам. На капітана судна у такій ситуації покладається завдання щодо прийняття рішень, не приділяючи особливої уваги якості наданої інформації. Але прибережні держави мають різні можливості, у т. ч. фінансові, технологічні, технічні тощо, у створенні та підтримці такої системи.

У другому випадку передбачається добровільний обмін інформацією між судовими операторами і судноводіями. Але уникаючи двох вищезгаданих проблем, з'являється ризик отримання нестандартизованої, а отже, неоднорідної за якістю інформації. І ця проблема, думається, може стати серйознішою за перші дві.

Інформація, незалежно від способу надання на судно, повинна відображатися на існуючій консолі на містку або на окремому спеціальному дисплеї. Правило V/19 Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (СОЛАС) [13] містить перелік судових навігаційних систем і обладнання, які повинні бути на судах, і визначає функції, які повинні виконувати кожна система і елемент обладнання. Крім того, існує можливість використання «інших засобів» для виконання необхідних функцій, але такі засоби повинні бути схвалені національною адміністрацією (Правило СОЛАС V/19(3)). Всі системи «повинні бути встановлені, протестовані і обслуговуватися таким чином, щоб звести до мінімуму несправності» (Правило СОЛАС V/19(4)). Кожна нова інформаційна система повинна відповідати цим вимогам, які, як правило, включені в багато детальніші вимоги Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) та Міжнародної організації зі стандартизації (ISO).

Однак, якщо нова інформація (наприклад, метеорологічні дані в режимі реального часу) накладається на існуючий екран, який є частиною стандартизованого обладнання, наприклад, ECDIS, додаткова функціональність, ймовірно, зробить обладнання нестандартизованим і не схваленим. Це вимагатиме подальшого тестування обладнання з метою встановити: по-перше, що новий потік даних не впливає на виконання вже стандартизованих функцій обладнання, по-друге, що відмова однієї з функцій не призведе до втрати або неправильної роботи інших функцій [13, 14].

Крім того, виникає необхідність навчання судноводія нової функціональності [15]. А далі виникає замкнене коло, коли неможливість пройти навчання судноводієм може стати підставою для втручання портових властей і змушення використання виключно стандартизованого обладнання з можливістю затримки судна. Наразі, під час сертифікації будь-яка додаткова функціональність, запроваджена виробниками, перевіряється на відповідність офіційним вимогам, хоча це не запобігає аварійним ситуаціям, що виникають через неправильне налаштування такої функціональності.

Звісно, існує альтернативний варіант – виведення даних на нову спеціальну консоль. Так, SOLAS не встановлює виключного переліку обладнання, яке повинно бути доступним на містку, але одночасно він вимагає, щоб нова консоль не узурпувала жодної з функцій системи або обладнання, передбачених Правилом V-19,

або щоб вона не вважалася АІС, яка обмінюється даними з береговими засобами відповідно до Правил V-19 2.4.5.4 [12].

Водночас, за таким варіантом використання нової консолі стає регульованим. Тоді судовласника, який першим перейде на новий функціонал електронної навігації, звинуватять у небезпечній практиці щодо забезпечення безпеки судноплавства та управління судном. Прибережна держава може заборонити використання такого обладнання, якщо воно експлуатується без дозволу адміністрації прапора, доки воно не стане відповідати міжнародно узгодженим вимогам до конструкції, дизайну, обладнання та укомплектування екіпажу (CDEM), як того вимагає стаття 21 (2) Конвенції ООН з морського права 1982 року (UNCLOS) [16, 17], іншими словами, доки воно не стане стандартизованим. Коло замкнулося: хотіли як краще, отримали як завжди.

Проміжний висновок складається у такому. Обидва розглянуті методи відображення додаткової електронної навігаційної інформації, не дивлячись на переваги та очевидні вигоди в ефективності, не сприяють конкуренції для постійного вдосконалення продукції і підвищення безпеки судноплавства. Вони штовхають рухатися дуже складним шляхом першочергового прийняття стандартизованих рішень. Цей повільний нормативно-правовий режим, характерний для судноплавства та ІМО, цілком навмисне усуває конкуренцію.

Коли мова йде про прийняття нових стандартів потоків даних на містку при впровадженні доповнень у систему е-навігації в увесь зріст встає питання навчання судноводіїв новим зразкам обладнання, в яких використовуватимуться ці дані, та яким чином вони впливатимуть на правила безпеки судноплавства.

Деякі фахівці вважають, що додаткова інформація, що відображатиметься на індикаторах, заплутає судноводіїв і спричинить проблеми при використанні традиційних засобів навігації. Як наслідок, збільшиться аварійність.

В основі підготовки моряків знаходяться вимоги Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року [7], яку застосовують держави прапора в усьому світі. Допуск судна в іноземні порти здійснюється за умови ретельного виконання вимог конвенції ПДНВ. Невиконання положень ПДНВ є підставою для затримання судна.

Конвенція ПДНВ однозначно прописує стандарти компетентності моряків, що стосуються їх

компетентності згідно функціональних обов'язків, роботи з електронними засобами та порядку використання електронної інформації тощо. Причому існуючі вимоги до підготовки стверджують, що використання електронних навігаційних засобів передбачає знання принципів їхньої роботи, вразливостей та помилок. Вказаний підхід стосується і будь-якої додаткової функціональності. Наведено деякі приклади таких стандартів.

Стандарти компетентності капітанів щодо визначення місцеположення «з використанням сучасних електронних навігаційних засобів, зі спеціальними знаннями принципів їх роботи, обмежень, джерел помилок, виявлення спотворення інформації та методів виправлення для отримання точної фіксації місцеположення» зафіксовані у таблиці А-II/2, колонка 2 [7].

У розділ В-I/12, параграф 8 (2) і 40 зафіксовано, що моряк має пройти обов'язкову підготовку для виявлення несправності або неправильне введення даних в електронне обладнання [7]. Деталізуючи це положення, програма підготовки з ECDIS вимагає від слухача вміння визначати ризики, пов'язані з використанням електронної інформації. Ризики розділ В-I/12, пп. 41 і 49 трактує як потенційні помилки в даних, що відображаються, особливо в поєднанні з надмірною довірою до нових технологій і нездатністю бути уважними [7]. Це ж саме стосується й АІС. Більш того, морякам рекомендується вживати заходів для виправлення неналежного встановлення обладнання [18]. Агентство морської та берегової охорони Великої Британії (МСА) додає, що необхідна перехресна перевірка наявної інформації, а не сліпа довіра до неї.

Підкреслимо, що згідно думок певної частини фахівців, використання додаткової інформації може збільшити навігаційні ризики через над-

мірну довіру і зниження пильності. Але це дуже спірне питання. У приклад приводять авіацію, яка характеризується високим рівнем стандартизації компонування кабіни пілота, що, в свою чергу, полегшує їх підготовку. Судноплавство, навпаки, має значні відмінності у компонуванні містків і, відповідно, вимагає більш формальної підготовки загального характеру, обмежуючи підготовку для конкретного типу судна. Але ж насправді, все не зовсім так. І порівняння рівнів стандартизації не дає об'єктивної оцінки здатності людини до засвоєння інформації. Основні причини, пов'язані не з фізичними обмеженнями фахівців щодо засвоєння додаткової навігаційної інформації і з ризиками, що виникають при цьому.

Висновки.

1. У сучасних умовах доцільно продовжити роботу щодо постійного зростання визначених компетенцій фахівця морської галузі у темпі зростання технічної оснащеності та комплексного впровадження новітніх інформаційних технологій у системи та комплекси судна.

2. Встановлений взаємний вплив діючих стандартів з підготовки фахівців морської галузі та впровадження нових інформаційних технологій на судні на стан безпеки судноплавства.

3. У ході з'ясування ролі координації та стандартизації на безпеку судноплавства та рівень підготовки судноводіїв встановлено, що проблема має вирішуватися як на ниві підготовки фахівців, правильної організації та несення вахти, підвищення пильності всіх членів екіпажу, так і шляхом аналізу регуляторних викликів електронній навігації, вивченню вимог до навчання моряків е-навігації та прискорення процесів стандартизації.

Предметом подальшого наукового пошуку можуть стати питання впливу електронної навігації на відповідальність власника судна.

Список літератури:

1. Бібік Н. М. Компетентнісний підхід : рефлексивний аналіз застосування. Компетентнісний підхід у сучасній освіті : світовий досвід та українські перспективи (Бібліотека з освітньої політики) : колективна монографія / кол. авт.: Н. М. Бібік, Л. С. Ващенко та ін. ; за заг. ред. О. В. Овчарук. Київ : К. І. С., 2004. С. 47–52.
2. Компетентнісний підхід у сучасній освіті: світовий досвід та українські перспективи : Бібліотека з освітньої політики України / під заг. ред. О. В. Овчарук. Київ : К. І. С., 2004. 112 с.
3. Пометун О. І. Дискусія українських педагогів навколо питань запровадження компетентнісного підходу в українській освіті. Компетентнісний підхід у сучасній освіті. Світовий підхід та українські перспективи / під заг. ред. О. В. Овчарук. Київ, 2004. 111 с.
4. Тараненко І. Розвиток життєвої компетентності та соціальної інтеграції : досвід Європейських країн / за ред. І. Г. Ємакова. Кроки до компетентності та інтеграції в суспільстві. Київ : Контекст, 2000. 336 с.
5. Щодо нормативно-методичного забезпечення розроблення галузевих стандартів вищої освіти : лист МОН України від 31.07.2008 № 1/9 – 484 / за заг. ред. В. Д. Шинкарука ; укл.: Я. Я. Болюбаш та ін.
6. Сухарніков Ю. Концептуальні підстави розробки і впровадження національної рамки (академічних) кваліфікацій України. *Вища школа*. 2012. № 3. С. 16–38.

7. Кодекс з підготовки і дипломування моряків та несення вахти (ПДМНВ) : офіц. перекл. Київ : Міністерство промислової політики України, 2010. 530 с.
8. Calvert E. Human Factors and the Collision Problem. *Journal of Navigation*. 1969. Vol. 22, No. 1. P. 48–56.
9. Fuchs J. E. Radar and Good Seamanship. *JAG Journal*. 1958. No. 3. P. 3–6.
10. Healy N. Radar Decision Re-Examined. *JAG Journal*. 1964. No. 18. P. 223.
11. Volk K. Some Legal Aspects of Collisions between Radar Equipped Ships. *North Carolina Law Review*. 1957. No. 36. P. 30.
12. IMO. Strategy for the development and implementation of e-Navigation. MSC 85/26/Add.1, Annex 20. 2009.
13. UN. The International Convention for the Safety of Life at Sea 1974 (SOLAS) (adopted on 1 November 1974, entry into force 25 May 1980). 32 UST 47; 1184 UNTS 278. 1974.
14. IMO. Resolution MSC.232(82): Adoption of the revised performance standards for Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS). 2006. P. 11, para. 15.11.
15. Adamopoulos A. Raising the alarm on ECDIS. *Lloyd's List*. 2018. 26 February. URL: <https://surl.li/xdhtbp> (дата звернення: 04.10.2024)
16. UN. 1982 United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) (adopted 10 December 1982, entry into force 16 November 1994). 1833 UNTS 3. 1982.
17. De Bièvre A. Vessel Traffic Services and the Law. *Journal of Navigation*. 1985. Vol. 38, No. 3. P. 347–364.
18. MCA. Radio: Operational Guidance on the Use of VHF Radio and Automatic Identification Systems (AIS) at Sea. MGN 324 (M+F) UK Department of Transport. 2006.

Shevchenko A.P., Yakusevych Yu.H., Dorofieieva Z.Ia., Tryshyn V.V. SOME PROBLEMS OF SEAFARER TRAINING AGAINST THE BACKGROUND OF THE INTRODUCTION OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE MARITIME TRANSPORT

The purpose of the study is to identify the mutual impact of existing standards for the training of maritime professionals and the introduction of new information technologies on board ships on the state of navigation safety. This goal is achieved by clarifying the role of coordination and standardization on the safety of navigation and the level of training of seafarers; analysing regulatory challenges to e-navigation, and studying the requirements for e-navigation training of seafarers. It is proved that numerous existing regulatory requirements and standards in some way impede the improvement of navigation safety through the introduction of new information technologies, which negatively affects the level of investment in navigation technologies in general. It is emphasized that from a legal and technical point of view, the receipt of additional navigation information into the ship's navigation systems does not reduce the liability of the shipowner arising from navigation errors. The shipowner can only be responsible for choosing and implementing the method of information flows to the ship. It is substantiated that the future development of maritime navigation systems will be hampered by the lack of standardization on board and ashore, incompatibility between ships, and an increased and unnecessary level of information complexity. The article shows a paradox caused by the fact that the IMO regulatory mechanisms, designed to implement minimum standards for all ships, prevent the rapid implementation of the latest developments. The latest information technologies, being ahead of the implemented standards, cannot make optimal use of additional information in terms of form and content. It is emphasized that the correct use of additional navigation information can improve the situational awareness of the navigator, but also become a source of complex problems. It is noted that coordination and standardization in the implementation of modern information technologies, which will improve the safety of navigation, affect the level of training of navigators. Consequently, there is a need to train a navigator in new functionality. The article shows the unambiguousness of seafarers' training in terms of their knowledge, skills, and abilities to work with electronic means and the procedure for using electronic information, and the need for timely modernization of the relevant standards.

Key words: standards of seafarers' training, maritime transport, ship, information technology, navigation system, navigation safety.

УДК 656.038
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/56>

Шпак Н.Г.

Одеський національний морський університет

Павловська Л.А.

Одеський національний морський університет

Коробкова О.М.

Одеський національний морський університет

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МОРСЬКИМ ПОРТОМ: НОВІТНІ МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

У статті розглядаються новітні можливості та виклики, що виникають в умовах воєнного стану в системі управління морським портом з позиції цифрової трансформації. В умовах воєнного стану морські порти відіграють критично важливу роль у забезпеченні національної безпеки, економічної стабільності та безперервного функціонування транспортних ланцюгів.

Цифрова трансформація управлінських процесів у портовій галузі набуває особливого значення, оскільки ефективне застосування інформаційних і комунікаційних технологій дозволяє підвищити оперативність та гнучкість портових операцій, зміцнити безпеку та захист портової інфраструктури, забезпечити стале функціонування логістичних ланцюгів, оптимізувати використання ресурсів, а також формувати умови для післявоєнного відновлення та розвитку.

Успішно реалізована цифрова трансформація створює фундамент для прискореного відновлення портової інфраструктури та інтеграції до світових логістичних мереж. Високий рівень цифровізації та ефективний обмін даними між портами, державними установами та бізнесом допомагають вибудувати сучасні транспортно-логістичні моделі, що залишаються релевантними й після завершення воєнних дій.

В умовах стрімкого розвитку інформаційних та комунікаційних технологій морські порти перетворюються на одні з ключових стратегічних ланок логістичних ланцюгів. Цифрова трансформація дозволяє значно підвищити ефективність управління портовими процесами, оптимізувати вантажні операції та забезпечити конкурентоспроможність у глобальному масштабі.

В статті запропонована формула інтегрального показника (IDG), яка допоможе оцінити поточний рівень цифрової готовності порту та визначити пріоритетні напрями для подальших інвестицій і розвитку.

Таким чином, дослідження та впровадження цифрових інструментів для модернізації системи управління морськими портами під час воєнного стану є не лише актуальними, а й невідкладними. Це дає змогу забезпечити стабільну роботу транспортної галузі, посилити національну безпеку, а також створити надійну основу для відбудови й довгострокового розвитку портової інфраструктури в повоєнний період.

Ключові слова: цифрова трансформація, морські порти, воєнний стан, портова інфраструктура, вантажні операції.

Постановка проблеми. Цифрова трансформація морської галузі в умовах воєнного стану розвивається під впливом безпекових, логістичних і стратегічних викликів. Вона охоплює посилення кіберзахисту, розширення можливостей для дистанційного керування та автоматизації, а також активне застосування аналітичних інструментів для гнучкої адаптації ланцюгів постачання.

Формування нових підходів до управління портами та портовою інфраструктурою дає

змогу забезпечити належну оборонну й економічну підтримку держави, а після закінчення війни – закласти основу для швидкого відновлення і модернізації.

По-перше, сучасні цифрові рішення – від аналітики «великих даних» до інтернету речей – відкривають нові можливості для автоматизованого моніторингу та контролю всіх стадій портової діяльності. Це дає змогу знижувати витрати часу й ресурсів, мінімізувати вплив людського фактора

та запобігати аварійним ситуаціям. По-друге, цифрові платформи і системи електронного документообігу спрощують взаємодію між учасниками транспортної логістики (перевізниками, експедиторами, державними контролюючими органами), підвищуючи прозорість і зменшуючи ризики шахрайства чи некоректних розрахунків.

Водночас процес діджиталізації супроводжується новими викликами: необхідністю перебудувати застарілу інфраструктуру, адаптувати нормативно-правову базу, забезпечити фахову підготовку персоналу та гарантувати кібербезпеку на всіх рівнях управління. Такі чинники вимагають комплексного підходу до планування та впровадження цифрових рішень, а також формування інноваційної екосистеми, що об'єднає державні органи, наукові установи й приватний бізнес.

Отже, дослідження цифрової трансформації системи управління морським портом є вкрай важливим для модернізації вітчизняних і міжнародних портових комплексів, підвищення їх конкурентоспроможності та інтеграції у світову транспортно-логістичну мережу. Це дасть змогу не лише розкрити потенціал новітніх технологій, але й сформувати підґрунтя для ефективних управлінських рішень, що сприятимуть сталому розвитку галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання цифрової трансформації в системі управління морським портом розглядалися багатьма як іноземними так і українськими науковцями. У дослідженнях [1-3] розглядаються фактори конкурентоспроможності портів у глобальній логістичній системі. Зокрема, акцент робиться на ролі портових вузлів у ланцюгах постачання та на ефективному використанні інновацій. Аналізу ролі цифрових платформ, що забезпечують прозору взаємодію між усіма учасниками процесу – від контейнерних ліній і митних органів до експедиторів і термінальних операторів розглядаються в публікаціях [4-5].

У працях [6-8] досліджуються різні форми залучення інвестицій у портову інфраструктуру: концесії, орендні угоди, приватизація, державно-приватне партнерство. Ці роботи підкреслюють зв'язок між ефективною моделлю управління та показниками прибутковості, а також якістю обслуговування клієнтів. Роботи [9-10] акцентують на важливості інтеграції портів з національними транспортними коридорами, зокрема з мережею TEN-T у ЄС.

Дослідження [11] фокусується на проблемах модернізації інфраструктури, вдосконаленні під-

ходів до управління портами, а також нормативно-правових реформах у контексті євроінтеграції.

У [13-14] згадується питання воєнного стану та відбудови портової інфраструктури в умовах воєнного стану та поствоєнний період. Автори наголошують, що саме цифрові технології (наприклад, автоматизовані системи моніторингу вантажопотоку, технології блокчейн для безпечного документообігу) дозволять швидко відновити порти та інтегрувати їх до глобальних логістичних мереж.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз цифрової трансформації системи управління морським портом та пропонування ефективних управлінських рішень, що сприятимуть сталому розвитку морської портової галузі.

Виклад основного матеріалу. В умовах воєнної загрози морська інфраструктура, зокрема портова система та корабельна навігаційна мережа, перебуває під підвищеним ризиком кібератак. Тому особливої уваги набувають розробка й впровадження систем виявлення і попередження (Intrusion Detection Systems, IDS), використання криптографічних рішень для захищеного обміну даними, постійний аудит та тестування вразливостей.

Воєнні дії можуть призвести до пошкодження базової інфраструктури (мереж, серверів, джерел живлення). Тому зростає актуальність хмарних рішень із географічно розподіленими дата-центрами, резервних серверів і каналів зв'язку, здатних виконувати критичні функції у разі виходу з ладу основних вузлів, підготовленого персоналу для швидкого відновлення роботи систем за надзвичайних обставин.

На рис. 1 наведемо схему, що ілюструє логічний ланцюжок цифрової трансформації системи управління морським портом від воєнних загроз і потреби в швидкій адаптації до отримання довгострокових переваг і відновлення після завершення воєнних подій. Вона може бути розширена чи деталізована залежно від фокусу дослідження (наприклад, додати конкретні технологічні платформи, аналітичні моделі, правові аспекти тощо).

Воєнний стан впливає на безпеку портової інфраструктури, логістику, доступ до ресурсів і персоналу, спричиняє необхідність швидкої адаптації та посиленого захисту. У період воєнних дій виникає потреба в екстреній цифровізації, формуванні нових методів керування і захисту. З іншого боку, це може стати «каталізатором» для впровадження інновацій і перебудови застарілих процесів.

Посилення кібербезпеки містить заходи зі встановлення сучасних систем захисту, моніто-



Рис. 1. Цифрова трансформація системи управління портом від воєнних загроз до отримання довгострокових переваг

Джерело: розроблено авторами

рингу та виявлення загроз, упровадження криптографічних протоколів тощо. Головна мета при цьому – запобігти кібератакам і забезпечити безперебійну роботу цифрової інфраструктури.

Автоматизація і роботизація передбачає використання безпілотних суден, роботизованих перевантажувальних комплексів, дистанційного керування, що дозволяє знижувати ризик для життя персоналу та підвищує точність і швидкість операцій.

Використання методів штучного інтелекту й машинного навчання для прогнозування попиту на перевезення, виявлення «вузьких місць» у логістиці, оперативного реагування на зміни ситуації забезпечує прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Інтегровані цифрові платформи та електронні сервіси для координації між усіма учасниками процесу (порти, перевізники, експедитори, державні органи) забезпечують швидкий обмін інформацією, зменшення паперового документообігу та підвищення прозорості.

Отриманий під час воєнного стану досвід цифрової трансформації та протидії загрозам стає основою для швидкої відбудови пошкодженої інфраструктури, дає змогу впроваджувати сучасніші технології та підвищувати конкурентоспроможність.

Завдяки комплексній цифровізації та інтеграції новітніх рішень, галузь здатна посилити позиції у світових логістичних ланцюгах і швидко реагувати на зовнішні виклики.

Для кількісної оцінки зрілості та готовності порту до цифрової трансформації пропонуємо використати інтегральний показник, умовно назовемо його Індекс цифрової готовності (IDG):

$$IDG = \frac{\alpha_1 \cdot IT + \alpha_2 \cdot AM + \alpha_3 \cdot DC + \alpha_4 \cdot CS}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \quad (1)$$

де *IT* (Information Technology) – рівень впровадження та інтеграції інформаційних технологій (системи управління портом, електронний документообіг тощо);

AM (Automation & Mechanization) – ступінь автоматизації та механізації (частка роботизованих операцій, безпілотних рішень, наявність систем дистанційного керування);

DC (Digital Connectivity) – рівень «цифрової конективності», тобто покриття сенсорними мережами (IoT), доступність Big Data, можливості обміну даними з різними учасниками;

CS (Cybersecurity) – кібербезпека та захищеність систем (наявність плану реагування на кібератаки, системи моніторингу та криптографічних рішень);

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритетність кожного компонента для конкретного порту.

Високе значення IDG свідчить про високу готовність до впровадження й активного використання цифрових технологій, що є ключовим фактором стійкості та конкурентоспроможності порту як у воєнних умовах, так і в період післявоєнного відновлення.

Нижче наведено умовний приклад розрахунку Індексу цифрової готовності (IDG) для порту Одеса за формулою (1). У прикладі наведені гіпотетичні оцінки, а також вагові коефіцієнти. Реальні показники можуть відрізнятися залежно від фактичного стану технологій, інфраструктури й рівня цифровізації порту.

Для порту Одеса припустимо, що кожен показник може оцінюватися за 10-бальною шкалою (де 0 – повна відсутність, а 10 – максимально високий рівень).

IT: 7.5 – частина портових систем управління впроваджена (Port Community System, електронний документообіг, базові аналітичні модулі), але повної інтеграції з усіма підрозділами поки що немає.

AM: 5 – автоматизація контейнерних терміналів часткова; роботизованих комплексів або безпілотних суден практично немає, але тривають пілотні проекти з впровадження автоматизованих кранів та AGV (Automated Guided Vehicles).

DC: 6 – базова інфраструктура IoT починає розвиватися, у порту є кілька «розумних» сенсорних точок моніторингу; водночас відсутнє масштабне Big Data – аналітичне ядро з повною інтеграцією даних.

CS: 4 – впроваджено базові механізми кібербезпеки, проте відсутня комплексна стратегія захисту критичних вузлів від кібератак; немає системи цілодобового моніторингу загроз (Security Operations Center).

Припустимо, що управління порту визначило такі пріоритети:

- $\alpha_1 = 3$ (IT – вагомий пріоритет, оскільки інформаційні системи вважаються ключовими для цифрової трансформації).
- $\alpha_2 = 2$ (AM – середній пріоритет, адже автоматизація потребує значних інвестицій, і її впроваджують поступово).
- $\alpha_3 = 3$ (DC – вагомий пріоритет, оскільки ефективна взаємодія та обмін даними з учасниками ланцюга постачань є критично важливими).
- $\alpha_4 = 2$ (CS – поки що не найвищий пріоритет, однак через воєнні ризики його значущість зростає).

Підставимо в формулу (1) вищевказані значення:

$$IDG = \frac{3 \cdot 7,5 + 2 \cdot 5 + 3 \cdot 6 + 2 \cdot 4}{3 + 2 + 3 + 2} = 5,85$$

Отримане значення 5.85 (на шкалі від 0 до 10) свідчить, що рівень цифрової готовності порту Одеса (за наведеним умовним прикладом) можна вважати середнім. З одного боку, порт має певні напрацювання в напрямі впровадження IT-рішень, але з іншого – все ще залишається простір для покращення автоматизації, посилення кібербезпеки й масштабування «цифрового зв'язку».

Для детальнішого планування робіт з модернізації рекомендується:

- Підвищувати рівень кіберзахисту (CS) через впровадження глибокого моніторингу, створення SOC (Security Operations Center) та комплексних систем безпеки.
- Розширювати автоматизацію (AM) шляхом розвитку роботизованих комплексів для розвантаження та безпілотних транспортних засобів.
- Узгоджувати IT та DC – інтегрувати різні інформаційні системи (Port Community System, CRM, ERP) і посилювати обмін даними з експедиторами, митними службами, логістичними операторами в реальному часі.

В перспективі, підвищивши ці складові, порт може збільшити IDG до 7–8 балів, що свідчитиме

про високий рівень цифрової зрілості й готовності до ефективної діяльності навіть у складних воєнних умовах.

Висновки. У процесі воєнних дій морські порти часто отримують вимушене «оновлення» систем, пов'язане з необхідністю впровадження новітніх захисних та комунікаційних рішень. Це може виявитися перевагою після завершення війни, коли високий рівень цифровізації дозво-

лить оперативно інтегруватися у глобальні логістичні ланцюги, а сучасні системи управління гарантуватимуть більшу конкурентоспроможність. Отриманий досвід та рішення, застосовані під час воєнного стану, допоможуть швидше перебудувати або відбудувати зруйновані термінали за сучасними цифровими стандартами й адаптувати управлінські моделі з урахуванням викликів безпеки та системного підходу до інвестицій у галузь.

Список літератури:

1. Notteboom T. E., Rodrigue, J. P. Port regionalization: towards a new phase in port development. *Maritime Policy & Management*. 2005. 32(3), Pp. 297–313. <https://doi.org/10.1080/03088830500139885>
2. Lin, Y., Li, Y., Liao, Z. and Deng, M. Analysis and Management of Laboratory Safety Causes in Universities: A Case Study of J University. *Advances in Applied Sociology*. 2024. 14, Pp. 89-103. doi: 10.4236/aasoci.2024.142006.
3. Panayides, P., Song, D.-W. Determinants of Users' Port Choice. In: Talley, W.K., Ed., *The Blackwell Companion to Maritime Economics*, Wiley-Blackwell, Oxford. 2012. Pp. 599-622. doi: 10.1002/9781444345667.ch29
4. Коробкова О.М., Павловська Л.А., Шпак Н.Г. Моделювання логістичних витрат в ланцюгах поставок зовнішньоторговельних вантажів. *Розвиток транспорту: Зб. наук. праць ОНМУ, № 2(17) (2023)*. – С. 133-142 (DOI <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.11>)
5. Korobkova O., Pavlovska L., Shpak N. Improvement of the interaction algorithm of participants during customs and logistics service of cargo. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ, вип. 203 (2023)* – С. 88-95
6. Olga Gonchar, Anatoliy Kholodenko, Nataliia Shpak «Optimization of Specific Custom Tariffs in the International Economic System» 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2023, Wrocław, Poland, September 21-23, 2023. IEEE 2023, ISBN 979-8-3503-1167-9 (DOI: 10.1109/ACIT58437.2023.10275368) (індексація в SCOPUS)
7. Павловська Л.А., Кириллова О.В., Коробкова О.М., Шпак Н.Г. Особливості моделювання інфраструктурного каркасу схем доставки вантажів у сучасних умовах. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського, серія: технічні науки, Том 34 (73) № 2 (2023)*. – С. 172-179 (DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/29>)
8. Основи класифікації інтелектуальних транспортних систем [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://pidru4niki.com/70950/tehnika/osnovi_klasifikatsiyi_intelektualnih_transportnih_sistem. (дата звернення 13.01.2025)
9. Integrated transport system [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Integrated_transport_system. (дата звернення 11.01.2025)
10. Amer, M. (2018). The Dry Port as a Holistic Approach for the Relocation of City Gateways. *Environmental Science & Sustainable Development*, 2(2), 42–53. <https://doi.org/10.21625/essd.v2i2.168>
11. Volkan Gumuskaya & Willem Jaarsveld & Remco Dijkman & Paul Grefen & Albert Veenstra, 2020. «A framework for modelling and analysing coordination challenges in hinterland transport systems,» *Maritime Economics & Logistics*, Palgrave Macmillan; International Association of Maritime Economists (IAME), vol. 22(1), pages 124-145, March.
12. Geerlings, H., Kuipers, B., & Zuidwijk, R. (Eds.). (2017). *Ports and Networks: Strategies, Operations and Perspectives* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315601540>
13. Коробкова О.М. Логістична діяльність підприємств в умовах воєнного стану. *Actual problems of modern science*. 2023. № 4. – С. 457-459
14. Павловська Л.А., Коробкова О.М., Шпак Н.Г. Формування інфраструктурного каркасу схем доставки дизельного палива у флексі-танках в умовах воєнного стану. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського, серія: технічні науки, Том 35 (74) № 4 (2024)*. – С. 314-320 (DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/48>)

Shpak N.G., Pavlovska L.A., Korobkova O.M. DIGITAL TRANSFORMATION OF THE SEA PORT MANAGEMENT SYSTEM: THE NEWEST OPPORTUNITIES AND CHALLENGES IN THE CONDITIONS OF THE STATE OF MARTIAL

The article examines the latest opportunities and challenges arising under martial law in the seaport management system from the standpoint of digital transformation. In the conditions of martial law, seaports play a critical role in ensuring national security, economic stability and smooth functioning of transport chains.

The digital transformation of management processes in the port industry is of particular importance, since the effective use of information and communication technologies makes it possible to increase the efficiency and flexibility of port operations, strengthen the security and protection of port infrastructure, ensure the sustainable functioning of logistics chains, optimize the use of resources, as well as create conditions for post-war recovery and development.

A successfully implemented digital transformation creates a foundation for accelerated restoration of port infrastructure and integration into global logistics networks. A high level of digitalization and effective data exchange between ports, government institutions and businesses help to build modern transport and logistics models that remain relevant even after the end of hostilities.

In the conditions of rapid development of information and communication technologies, sea ports are turning into one of the key strategic links of logistics chains. Digital transformation makes it possible to significantly increase the efficiency of port process management, optimize cargo operations and ensure competitiveness on a global scale.

The article proposes an integral indicator formula (IDG), which will help assess the current level of digital readiness of the port and determine priority areas for further investment and development.

Thus, research and implementation of digital tools to modernize the maritime port management system during martial law is not only relevant, but also urgent. This makes it possible to ensure the stable operation of the transport industry, strengthen national security, and also create a reliable basis for the reconstruction and long-term development of the port infrastructure in the post-war period.

Key words: digital transformation, sea ports, martial law, port infrastructure, cargo operations.

Відомості про авторів

Абдулін М.З. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Андріянова М.В. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри технологій природних та синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Беднарська І.С. – асистентка кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бех П.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного сервісу та логістики Українського державного університету науки і технологій

Біганич В.Ю. – старший викладач кафедри оптики ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Білоног О.В. – аспірант кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

Боженко М.Ф. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бойко О.С. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Бойко С.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Бондар Є.В. – викладач кафедри бронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України

Борисенко Т.М. – головний конструктор ТОВ «Агенство продажу активів»

Бошков Л.З. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екоенергетики, термодинаміки та прикладної екології Одеського національного технологічного університету

Букет О.І. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бутенко О.С. – аспірант кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Валуйський С.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Васильєв Г.С. – доктор технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Васильєва Л.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Верпівський С.М. – заступник начальника кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Висоцька І.І. – доцент кафедри організації авіаційних перевезень Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Вишневська О.Д. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Вишневський Д.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Войченко Т.О. – кандидат економічних наук, доцент, виконуючий обов'язки завідувача кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Волгушева Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

Волобуєва Т.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування Одеської державної академії будівництва та архітектури

Воробйова В.І. – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гаранін Є.В. – аспірант третього курсу групи А144 кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

Геворкян Е.С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Герасименко І.М. – доцент кафедри організації авіаційних перевезень Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Герашенко А.Ю. – студент другого курсу магістратури кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гірук Д.О. – студентка кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Головенко В.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Гордєєв М.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Гречановський А.П. – аспірант другого курсу групи А144 кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

Гуляєв В.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Демидюков О.В. – аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Дерябіна І.О. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Доля Г.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної та прикладної системотехніки Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

Доній О.М. – доктор технічних наук, професор кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дорофєєва З.Я. – старший викладач кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Дудка М.В. – аспірант кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Євич М.Я. – старший викладач кафедри теоретичної фізики ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Євсєєва М.В. – кандидат хімічних наук, доцент Вінницького національного медичного університету імені М.І. Пирогова

Єсич Д.В. – студент другого курсу магістратури кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Жданов О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування Одеської державної академії будівництва та архітектури

Живков О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Забалуєв А.С. – асистент кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Іванченко А.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

- Кішнян І.В.** – старший викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)
- Коваленко А.Л.** – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету
- Коваль Д.С.** – магістр з дипломом кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій
- Коваль М.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету
- Козинка О.С.** – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій
- Кононова І.В.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач Спеціальної кафедри №4 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Коробкова О.М.** – кандидат економічних наук, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету
- Коскіна Ю.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету
- Котов О.Б.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»
- Котова С.О.** – старший викладач кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету
- Кравченко О.В.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету
- Красулін О.С.** – старший викладач кафедри «Транспортні технології підприємства» Приазовського державного технічного університету
- Круглов О.В.** – курсант 321 навчальної групи Національної академії Національної гвардії України
- Кувшинов А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування Одеської державної академії будівництва та архітектури
- Куник А.А.** – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Кучеренко В.Л.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»
- Лашков О.В.** – старший викладач кафедри транспортного сервісу та логістики Українського державного університету науки і технологій
- Лебедев Д.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Лебідь Г.О.** – старший викладач кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»
- Лисенко О.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Ліночева О.В.** – доктор технічних наук, професор кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Лісовський С.В.** – асистент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій
- Ловська А.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту
- Майзеліс А.О.** – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Малиновський О.А. – старший викладач кафедри автотехнічного забезпечення Військової академії (м. Одеса)

Маннапова О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Мартинюк В.В. – кандидат технічних наук, доцент Вінницького національного технічного університету

Мартинюк Г.І. – асистент Вінницького національного технічного університету

Марченко Н.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних кібернетичних систем Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Масліч Н.Я. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри інженерної механіки Військової академії (м. Одеса)

Мельник Л.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мельников І.А. – аспірант кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету

Мініна Ю.О. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Мітіна Н.Б. – кандидат технічних наук, завідувач кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Міхненко Я.О. – аспірант кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Могилянець Т.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки Військової академії (м. Одеса)

Монченко О.В. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Морозова О.М. – аспірантка кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Мощенко А.С. – аспірант кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мурад'ян А.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Нікітін М.О. – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Нікішин В.А. – викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Окороков А.М. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортного сервісу та логістики Українського державного університету науки і технологій

Осадчук М.В. – науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежнорятівної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Осадчук О.В. – доктор технічних наук, професор Вінницького національного технічного університету

Павленко В.Я. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Павловська Л.А. – кандидат економічних наук, доцент, професор, професор кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Пантелєєва І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія»

Петрик Ю.М. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Петров Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Пліта Л.Л. – доктор філософії за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт», старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Подольн В.О. – магістр, науковий співробітник у галузі морського транспорту CRC TRANSPORT Одеського національного морського університету

Поліщук М.М. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Поляк П.К. – аспірант кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету

Присяжнюк В.В. – кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Приходько Д.М. – магістр з дипломом кафедри вагонів та вагонного господарства Навчально-наукового інституту «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» Українського державного університету науки і технологій

Прокудін Г.С. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету

Пронь С.В. – доцент кафедри організації авіаційних перевезень Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Райда І.М. – старший викладач кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Решетков Д.М. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри експлуатації портів і технологій вантажних робіт Одеського національного морського університету

Риндюк Д.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Родін Д.О. – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Романюк В.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри забезпечення державної безпеки Національної академії Національної гвардії України

Рукавішников П.В. – старший викладач кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту Українського державного університету залізничного транспорту

Рященко О.І. – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Свідерський В.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Свірський В.В. – молодший науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Сгадов С.О. – старший викладач кафедри «Комп'ютерні систем та мережі» Національного університету «Запорізька політехніка»

Семичасівський С.В. – старший науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Сільванська Г.М. – кандидат економічних наук, доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Сокол О.Д. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Соловйова О.О. – доцент кафедри економіки та бізнес-технологій Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Стародубцев С.О. – кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри забезпечення державної безпеки Національної академії Національної гвардії України

Степанов О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри тракторів і автомобілів Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Сусла А.І. – викладач кафедри оптики ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Тихонов М.В. – аспірант кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тищенко Є.О. – аспірант кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Ткач М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тришин В.В. – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Трофименко І.В. – кандидат технічних наук, виконуючий обов'язки завідувача кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Турпак С.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Урум Н.С. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Ущановський Д.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Федоренко О.Ю. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Федунов В.М. – старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Фомін О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Фролова Л.А. – доктор технічних наук, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» «Український державний хіміко-технологічний університет»

Черваков О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій природних та синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Черненко П.В. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Національної академії Національної гвардії України

Чубко Л.С. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри біотехнології Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Шапенко Є.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

Шевцов К.О. – аспірант кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шевченко А.П. – доктор філософії за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт», старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Шелухін С.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Шкода В.О. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Шорнікова С.В. – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Шпак Н.Г. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Шуста В.С. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник, доцент кафедри оптики ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Шуста В.Ю. – начальник відділу Закарпатської філії ДП Івано-Франківськстандартметрологія

Якіменко М.Л. – науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежо-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Якусевич Ю.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Ярошевський В.В. – аспірант кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

Ясногор М.В. – магістр кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 1 2025

Частина 1

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 34,67. Ум. друк. арк. 45,57. Зам. № 0325/255

Підписано до друку 21.02.2025. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.