

**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) № 5 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;

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 № 4 від 27 листопада 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.

Ідентифікатор медіа: R30-04000.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського
(просп. Берестейський, 10, м. Київ, 01135, e-mail: crimea.tnu@gmail.com, тел.: +38 (044) 529-05-16).

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

Періодичність: 6 разів на рік.

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

Лукашенко В.А., Бернацький А.В., Бондарєва В.І., Гардер Д.А., Набок Т.М., Курило В.А., Бацак А.М. Гринь А.П., Лукашенко В.М. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ БАГАТООСЬОВОГО МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ.....	1

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Немченко М.В. РОБОТА СТІЧКОВИХ ТРАНСПОРТЕРІВ ПРИ ПЕРЕМІЩЕННІ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР: ВПЛИВ НА ЗБЕРЕЖЕННЯ МАСИ ТА ЯКІСТЬ ЗЕРНА.....	8
Роганін М.В., Гончаренко О.О. ВИКОРИСТАННЯ 3D-СКАНУВАННЯ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ГЕОМЕТРІЇ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ТВЕРДОСПЛАВНИХ СТАЛЕЙ.....	15

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Стратонов В.М., Мусієнко А.Д. ПРОБЛЕМА СУЇЦИДАЛЬНОГО ТЕРОРИЗМУ НА АВІАЦІЙНОМУ ТРАНСПОРТІ: ПЕРСПЕКТИВИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ АКТИВ НЕЗАКОННОГО ВТРУЧАННЯ.....	23

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Валуженич О.О., Ключник І.І. СУЧАСНІ ПРИЛАДИ КОЛЬОРОМЕТРІЇ У МОНІТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА. МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРОБЛЕМИ ТОЧНОСТІ... ..	28
Невлюдов І.Ш., Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Валуженич О.О. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНИМ 3D-ДРУКОМ... ..	33

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Vetoshko I.P. EFFICIENT RESOURCE ALLOCATION IN 5G SA: IMPACT OF SCHEDULING ON GBR AND NON-GBR TRAFFIC.....	41
Гуйда О.Г., Юсипів Т.В., Юсипів А.Р. ГІБРИДНІ НЕЧІТКІ ГЕНЕТИЧНІ АЛГОРИТМИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СТІЙКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ: РОЗШИРЕНА МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА РОБАСТНОСТІ.....	49
Демиденко О.А., Лебедев Д.Ю., Омелян А.В. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРИСТАЛЬТИЧНОГО НАСОСА НА ОСНОВІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА.....	55
Михалевський Д.В., Макогон В.І., Ентін І.І. ОЦІНЮВАННЯ ПОКРИТТЯ КОРПОРАТИВНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ WI-FI У ПРИМІЩЕННІ.....	61
Міхненко Я.О. АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОСЛУГ ДЛЯ БАГАТОКОРИСТУВАЧЬКОГО СЕРЕДОВИЩА В КОГНІТИВНІЙ РАДІОМЕРЕЖІ.....	67
Романов О.І., Нестеренко М.М., Марінов А.І. МОДИФІКОВАНИЙ БАГАТОШЛЯХОВИЙ МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В SDN МЕРЕЖАХ ДАТА-ЦЕНТРІВ.....	74
Сайко В.Г., Радзівілов Г.Д., Комаров В.О., Наритник Т.М., Фісюк А.О., Криволапов Я.В., Криволапов Г.Я. МОДЕЛЬ РОЗРОБКИ ПРОМІЖНИХ ЛАНОК ГІБРИДНОЇ WI-FI ТА MESH-МЕРЕЖІ НА БАЗІ КАНАЛУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ.....	87
Тимофєєв Є.М., Лисенко О.І. МЕТОД ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	97

Tsybmal O.V., Antoniuk O.I.

SPREAD SPECTRUM MODULATION TECHNIQUE INVESTIGATION FOR PLL LESS CLOCK GENERATOR USING MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT.....106

ЕНЕРГЕТИКА

Баранюк О.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЙ І ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ В КОНТУРІ ПРИРОДНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ КОТЛА ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ).....118

Босак А.В., Кондратенко Д.А., Тесленко О.І.

РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ГІБРИДНОГО АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЛАНЦЮГОВОГО КОНВЕЄРА.....125

Бошкова І.Л., Волгушева Н.В., Гречановський А.П., Борець С.О., Тортіка Д.М.

ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СУШІННЯ ЦЕОЛІТІВ 13Х У МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ.....131

Рачинський А.Ю.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ У ВЕРХНЬОМУ БАРАБАНІ КОТЛА ДКВР 10-13.....138

Серденко Т.В., Бродович Ю.Р., Козарь О.П., Максютова О.В.

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ЗАКАРПАТТІ: ПОТЕНЦІАЛ, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ.....144

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Іщенко К.С., Новіков Л.А., Коновал В.М., Пономаренко І.О., Мазур О.М., Демченко О.В.

АНАЛІТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ДІЇ ВИБУХУ В МАСИВІ КРИСТАЛІЧНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД 149

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Дудка М.В., Воробйова В.І., Бик М.В.

ОКИСНО-ВІДНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИРОДНИХ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК ЕКСТРАКТУ ШИШОК ХМЕЛЮ, ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ РОЗЧИННИКАМИ.....161

Єфименко В.В., Олександренко В.П., Кустовська А.Д., Руденко В.М., Матвєєва О.Л., Трофімов І.Л.

ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ВИРОБНИЦТВА ІМПЛАНТАНТІВ ТА ПРОТЕЗІВ.....166

Іщенко О.В., Москаль Р.М.

БІОРОЗКЛАДНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ КРОХМАЛЮ.....175

Кучук М.С., Кравченко О.В., Іванченко А.В., Коваленко А.Л.

ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕРІВНОВАЖНОЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ 181

Myronyuk O.V., Naumchyk A.O., Baklan D.V., Linyucheva O.V., Sikorsky O.O.

DEVELOPMENT OF CORN STALK- AND COCONUT SHELL-BASED FILLERS AND THEIR UTILIZATION IN POLYLACTIDE COMPOSITES.....186

Myronyuk O.V., Baklan D.V., Savchenko D.O., Pashchenko E.A.

TUNING THE WETTING PROPERTIES OF LOW-DENSITY POLYETHYLENE FILMS VIA CHEMICAL OXIDATION AND STEARIC ACID MODIFICATION.....194

Петренко Т.В., Ковальова С.О., Макаренко О.Г., Майборода О.І.

ДЗЕТА-ПОТЕНЦІАЛ ЯК ФАКТОР СТАБІЛЬНОСТІ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ.....201

Портянко Т.М., Богатирьова О.О.

МЕТОДИКА ПІДГОТОВКИ ВОДИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОЇ РОБОТИ БІОХІМІЧНОГО АНАЛІЗАТОРА COBAS 800 (НА ПРИКЛАДІ ДІАГНОСТИЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ ТОВ «ЦЕНТР СЛУЖБИ КРОВІ «БІОФАРМА ПЛАЗМА»).....210

Степанова Д.С., Майзеліс А.О.

ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО МУЛЬТИШАРОВОГО ПОКРИТТЯ [(CU-ZN)_{БАЗ}/(CU-ZN)_{ДОД}]_N-MWCNT.....217

Столяренко Г.С., Коваль М.Г., Фоміна Н.М.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОХЕМОДЕСТРУКЦІЇ СПОЛУК, ЩО ВАЖКО РОЗКЛАДАЮТЬСЯ.....225

Столяренко Г.С., Коваль М.Г., Фоміна Н.М.

ЕЛЕКТРОАКТИВАЦІЯ ЯК МЕТОД РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД НА СТАДІЇ ВОДОПІДГОТОВКИ.....232

Федоренко В.В., Бегдай А.О., Яременко В.В., Гой А.М., Іщенко О.В., Бессарабов В.І. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВАЛІДАЦІЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНОЇ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНОГО ВМІСТУ РИВАРОКСАБАНУ У ТВЕРДИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМАХ.....	241
Христич О.В., Корогодська А.М. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕХАНІЗМУ ФАЗОУТВОРЕННЯ ЦЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ СПОЛУК СИСТЕМИ $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$	250

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Фролова Н.Е., Борисова Е.О., Самойленко П.О. Гмиря О.О. АЮРВЕДИЧНІ СТРАВИ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОГО МЕНЮ СУЧАСНОГО РЕСТОРАННОГО ЗАКЛАДУ.....	256

ТРАНСПОРТ

Кириченко О.С., Клочков Ю.П., Мельник В.Ю., Коломієць Д.П., Вечурко О.М., Шевченко В.І. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ГІРОСКОПІВ СУДНОВОЇ НАВІГАЦІЇ.....	262
Клименко В.В., Разумова К.М., Новальська Н.І., Селіщев С.В., Єрошенко О.Р. ВПЛИВ ПАНДЕМІЇ COVID-19 НА ОРГАНІЗАЦІЮ І УПРАВЛІННЯ ГУМАНІТАРНИМ ЛАНЦЮГОМ ПОСТАВОК.....	271
Korobko A.I., Semenov I.V. ADAPTATION OF ALL-WHEEL DRIVE WHEELED TRANSPORT AND TRACTION VEHICLES TO NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS.....	278
Лукін Є.О. ПОРТОЦЕНТРИЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ РИЗИКІВ: СКООРДИНОВАНИЙ ПІДХІД SOP- ТА ESS-ОПТИМІЗАЦІЇ.....	284
Прокудін О.Г., Воркут Т.А., Петунін А.В. ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИКИ РОЗПОДІЛЬНИХ ЦЕНТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ DIGITAL TWIN: СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТА КОМУНІКАЦІЙНІ ПІДХОДИ.....	291
Решетков Д.М., Ларіна І.М. ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ ГАЛУЗІ У КОНТЕКСТІ ОНОВЛЕНОЇ НАЦІОНАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СТРАТЕГІЇ УКРАЇНИ ДО 2030 РОКУ.....	299
Хоботня Т.Г., Рой М.П., Пазич В.Л., Кочкін І.А. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ.....	306
Хоботня Т.Г., Стеценко І.А., Мазорчук Т.В., Бордюг Д.Р. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЗАЛЕЖНО ВІД РІВНЯ КОЕФІЦІЄНТА ДОВІРИ ПІД ЧАС ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ТЕОРІЇ ІГОР З ПРИРОДОЮ.....	311
Холодний Ю.Ф., Поліщук Д.В., Алтухов П.М., Жовтобрюх В.О. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРИВОДІВ У КОНСТРУКЦІЇ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ТРАНСПОРТУ.....	318

ЕЛЕКТРОНІКА

Барило Г.І., Голяка Р.Л., Брич М.В., Шлюсар Ю.А., Онутчак Т.А. РЕАЛІЗАЦІЯ СИГНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА УЛЬТРАЗВУКОВИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ПРОГРАМОВАНОЇ СИСТЕМИ НА КРИСТАЛІ.....	328

РЕЦЕНЗІЇ

Немченко М.В. РЕЦЕНЗІЯ НА СТАТТЮ ВИКЛАДАЧІВ АГРАРНИХ ФАКУЛЬТЕТІВ БРАЗИЛІЇ V. ZIEGLER, R.T. PARAGINSKI ТА C.D. FERREIRA «GRAIN STORAGE SYSTEMS AND EFFECTS OF MOISTURE, TEMPERATURE AND TIME ON GRAIN QUALITY – A REVIEW».....	334
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	336

CONTENTS

MACHINE SCIENCE

Lukashenko V.A., Bernatskyi A.V., Bondarieva V.I., Harder D.A., Nabok T.M., Kurylo V.A., Batsak A.M., Hryn A.P., Lukashenko V.M.

SELECTION OF THE OPTIMAL KINEMATIC SCHEME
OF A MULTI-AXIS MANIPULATOR FOR LASER WELDING PROCESSES.....1

INDUSTRIAL ENGINEERING

Nemchenko M.V.

OPERATION OF BELT CONVEYORS DURING GRAIN CROP TRANSPORTATION:
IMPACT ON MASS PRESERVATION AND GRAIN QUALITY..... 8

Rohanin M.V., Honcharenko O.O.

APPLICATION OF 3D SCANNING FOR DIAGNOSTICS
AND RESTORATION OF THE GEOMETRY OF WORN HARD-ALLOY STEEL PARTS..... 15

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Stratonov V.M., Musiienko A.D.

THE PROBLEM OF SUICIDAL TERRORISM IN AIR TRANSPORT: PROSPECTS
FOR PREVENTING ACTS OF UNLAWFUL INTERFERENCE..... 23

ELECTRICAL ENGINEERING

Valuzhenych O.O., Klyuchnyk I.I.

MODERN COLOURIMETRY DEVICES IN MONITORING THE ECOLOGICAL STATE
OF THE ENVIRONMENT. METROLOGICAL ANALYSIS AND ACCURACY ISSUES..... 28

Nevlyudov I.Sh., Nikitin D.O., Strilets R.E., Valyuzhenych O.O.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR PHOTO-POLYMER 3D PRINTING.. 33

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Vetoshko I.P.

EFFICIENT RESOURCE ALLOCATION IN 5G SA:
IMPACT OF SCHEDULING ON GBR AND NON-GBR TRAFFIC..... 41

Guida O.G., Yusyypiv T.V., Yusyypiv A.R.

HYBRID FUZZY GENETIC ALGORITHMS FOR OPTIMIZING THE RESILIENCE
OF INFORMATION SYSTEMS: AN EXTENDED PROTECTION MODEL CONSIDERING ENERGY
EFFICIENCY AND ROBUSTNESS.....49

Demydenko O.A., Lebedev D.Y., Omelyan A.V.

MODELING OF A PERISTALTIC PUMP BASED ON A PIEZOELECTRIC MOTOR..... 55

Mykhalevskyi D.V., Makogon V. I., Entin I.I.

ASSESSMENT OF COVERAGE OF CORPORATE WIRELESS NETWORKS
OF THE WI-FI STANDARD IN THE ROOM..... 61

Mikhnenko Ya. O.

ANALYSIS OF WAYS TO IMPROVE THE QUALITY OF SERVICES
FOR A MULTI-USER ENVIRONMENT IN A COGNITIVE RADIO NETWORK.....67

Romanov O.I., Nesterenko M.M., Marinov A.I.

MODIFIED MULTIPATH LOAD BALANCING METHOD IN SDN OF DATA CENTERS..... 74

Saiko V.G., Radzivilov G.D., Komarov V.O., Narytnyk T. M., Fysiuk A.O., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya.

MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF INTERMEDIATE LINKS IN HYBRID WI-FI AND MESH
NETWORKS BASED ON THE TERAHERTZ BAND CHANNEL..... 87

Tymofeiev Ye.M., Lysenko O.I.

METHOD OF USING MIMO TECHNOLOGY TO INCREASE THE BANDWIDTH
OF MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS..... 97

Tsybmal O.V., Antoniuk O.I.

SPREAD SPECTRUM MODULATION TECHNIQUE INVESTIGATION FOR PLL LESS CLOCK
GENERATOR USING MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT.....106

POWER ENGINEERING

Baranyuk O.V.

MODELING OF FLOW AND PHASE TRANSITION IN THE NATURAL CIRCULATION CIRCUIT OF THE GM-50-1 BOILER (N-50-3.9-440GM).....118

Bosak A.V., Kondratenko D.A., Teslenko O.I.

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A HYBRID CONTROL ALGORITHM TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF A CHAIN CONVEYOR.....125

Boshkova I.L., Volgusheva N. V., Hrechanovskyi A.P., Borets S.O., Tortika D.M.

STUDY OF THE DRYING FEATURES OF ZEOLITES 13X IN A MICROWAVE FIELD.....131

Rachynskyi A.Yu.

MODELING OF WATER STEAM SEPARATION PROCESSES IN THE UPPER DRUM OF THE DKVR 10-13 BOILER.....138

Serdenko T.V., Brodovich Yu.R., Kozar O.P., Maksyutova O.V.

ECOLOGICAL ASPECTS OF RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT IN ZAKARPATTIA: POTENTIAL, CHALLENGES AND PROSPECTS.....144

RESOURCE DEVELOPMENT

Ishchenko K.S., Novikov L.A., Konoval V.M., Ponomarenko I.O., Mazur O.M., Demchenko O.V.

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL APPROACHES TO ASSESSING THE EFFECTS OF AN EXPLOSION IN A CRYSTALLINE MOUNTAIN ROCKS MASSIF.....149

CHEMICAL TECHNOLOGY

Dudka M.V., Vorobiova V.I., Byk M.V.

THE REDOXIDATION (REDOX) PROPERTIES OF NATURAL ORGANIC COMPOUNDS OF HOPS CONES EXTRACT OBTAINED BY VARIOUS SOLVENTS.....161

Yefymenko V.V., Oleksandrenko V.P., Kustovska A.D., Rudenko V.M., Matveeva O.L., Trofimov I.L.

POLYMERIC MATERIALS IN THE TECHNOLOGIES OF IMPLANT AND PROSTHESIS MANUFACTURING.....166

Ishchenko O.V., Moskal R.M.

BIODEGRADABLE POLYMER MATERIALS BASED ON STARCH.....175

Kuchuk M.S., Kravchenko O.V., Ivanchenko A.V., Kovalenko A.L.

WATER DISINFECTION USING NON-EQUILIBRIUM LOW-TEMPERATURE PLASMA.....181

Myronyuk O.V., Naumchyk A.O., Baklan D.V., Linyucheva O.V., Sikorsky O.O.

DEVELOPMENT OF CORN STALK- AND COCONUT SHELL-BASED FILLERS AND THEIR UTILIZATION IN POLYLACTIDE COMPOSITES.....186

Myronyuk O.V., Baklan D.V., Savchenko D.O., Pashchenko E.A.

TUNING THE WETTING PROPERTIES OF LOW-DENSITY POLYETHYLENE FILMS VIA CHEMICAL OXIDATION AND STEARIC ACID MODIFICATION.....194

Petrenko T.V., Kovalova S.O., Makarenko O.H., Mayboroda O.I.

ZETA POTENTIAL AS A STABILITY FACTOR OF DISPERSED SYSTEMS.....201

Portianko T.M., Bohatyriova O.O.

METHODOLOGY OF WATER PREPARATION FOR ENSURING STABLE OPERATION OF THE COBAS® 8000 BIOCHEMICAL ANALYZER (CASE STUDY OF THE DIAGNOSTIC LABORATORY LLC «BLOOD SERVICE CENTER «BIOFARMA PLASMA») 210

Stepanova D.S., Maizelis A.O.

ELECTROCHEMICAL FORMATION OF $[(\text{Cu-Zn})_{\text{BA3}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{ДОД1N}}]$ -MWCNT COMPOSE MULTILAYER COATING.....217

Stoliarenko H.S., Koval M.G., Fomina N.M.

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGICAL SCHEME FOR THE ELECTROCHEMICAL DESTRUCTION OF HARD-TO-DECOMPOSE COMPOUNDS.....225

Stoliarenko H.S., Koval M.G., Fomina N.M.

ELECTROACTIVATION AS A RESOURCE-SAVING METHOD IN SURFACE WATER TREATMENT TECHNOLOGY AT THE WATER PREPARATION STAGE.....232

Fedorenko V.V., Behdai A.O., Yaremenko V.V., Goy A.M., Ishchenko O.V., Bessarabov V.I. DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A SPECTROPHOTOMETRIC METHOD FOR DETERMINING THE QUANTITATIVE CONTENT OF RIVAROXABAN IN SOLID DISPERSION SYSTEMS.....	241

Khrystych O.V., Korogodska A.M. STUDY OF THE SPECIFIC ASPECTS OF THE PHASE FORMATION MECHANISM OF CEMENTS BASED ON $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ SYSTEM COMPOSITION	250

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Frolova N.E., Borysova E.O., Samoilenko P.O., Hmyria O.O. DEVELOPMENT OF AYURVEDIC DISHES FOR THE INNOVATIVE MENU OF A MODERN RESTAURANT.....	256

TRANSPORT

Kyrychenko O.S., Klochkov Y.P., Melnyk V.Y., Kolomiets D.P., Vechurko O.M., Shevchenko V.I. MODELING OF OPERATING CHARACTERISTICS OF A THERMOELECTRIC MODULE FOR FIBER-OPTIC GYROSCOPES IN MARINE NAVIGATION.....	262

Klymenko V.V., Razumova K.M., Novalska N.I., Selishchev S.V., Yeroshenko O.R. IMPACT OF THE COVID-19 PANDEMIC ON THE ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF THE HUMANITARIAN SUPPLY CHAIN.....	271

Korobko A.I., Semenov I.V. ADAPTATION OF ALL-WHEEL DRIVE WHEELED TRANSPORT AND TRACTION VEHICLES TO NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS.....	278

Lukin Ye.O. PORT-CENTRIC ENERGY RESILIENCE PLANNING UNDER CLIMATE RISK: A COORDINATED SOP-ESS OPTIMIZATION APPROACH.....	284

Prokudin O.G., Vorkut T.A., Petunin A.V. OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION CENTER LOGISTICS USING DIGITAL TWIN: MODERN INFORMATION AND COMMUNICATION APPROACHES.....	291

Reshetkov D.M., Larina I.M. PROBLEMS OF PORT INDUSTRY DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF THE UPDATED NATIONAL TRANSPORT STRATEGY OF UKRAINE UNTIL 2030.....	299

Khobotnia T.H., Roi M.P., Pazyh V.L., Kochkin I.A. FEATURES OF TECHNICAL SUPPORT FOR INTERNATIONAL FREIGHT TRANSPORT BY ROAD..	306

Khobotnia T.H., Stetsenko I.A., Mazorchuk T.V., Bordiuh D.R. OPTIMAL STRATEGY SELECTION BASED ON THE CONFIDENCE COEFFICIENT IN DECISION-MAKING PROBLEMS IN GAMES AGAINST NATURE.....	311

Kholodnyi Y.F., Polishchuk D.V., Altuhov P.M., Zhovtobryukh V.O. PROSPECTS FOR THE USE OF INTELLIGENT HYDRAULIC ACTUATORS IN THE DESIGN OF BRAKE SYSTEMS FOR SPECIALISED VEHICLES.....	318

ELECTRONICS

Barylo H.I., Holyaka R.L., Brych M.V., Shliusar Yu.A., Onutchak T.A. DESIGN AND DEVELOPMENT OF A SIGNAL CONVERTER FOR ULTRASONIC SENSORS BASED ON A PROGRAMMABLE SYSTEM-ON-CHIP.....	328

REVIEWS

Nemchenko M.V. REVIEW OF THE ARTICLE BY ACADEMIC STAFF FROM BRAZIL'S AGRARIAN FACULTIES V. ZIEGLER, R.T. PARAGINSKI AND C.D. FERREIRA «GRAIN STORAGE SYSTEMS AND EFFECTS OF MOISTURE, TEMPERATURE AND TIME ON GRAIN QUALITY – A REVIEW».....	334

INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	336

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/01>

Лукашенко В.А.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Бернацький А.В.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Бондарєва В.І.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Гардер Д.А.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Набок Т.М.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Курило В.А.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Бацак А.М.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Гринь А.П.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона
Національної академії наук України

Лукашенко В.М.

Черкаський державний технологічний університет

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ БАГАТООСЬОВОГО МАНІПУЛЯТОРА ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ

У сучасному машинобудуванні та високотехнологічному виробництві лазерне зварювання займає провідне місце завдяки своїм перевагам – високій точності, мінімальній зоні термічного впливу, можливості автоматизації та забезпеченню високої якості зварних з'єднань. Одним із ключових елементів роботизованих систем лазерного зварювання є багатоосьовий маніпулятор, який забезпечує просторове позиці-

© Лукашенко В.А., Бернацький А.В., Бондарєва В.І., Гардер Д.А.,
Набок Т.М., Курило В.А., Бацак А.М., Гринь А.П., Лукашенко В.М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

онування лазерного випромінювача. Від вибору його кінематичної схеми залежать точність, надійність та ефективність усього процесу. Однак на сьогодні відсутня універсальна методика, яка дозволяє обґрунтовано визначати оптимальну структуру маніпулятора з урахуванням специфічних вимог лазерного зварювання, таких як стабільність швидкості руху, жорсткість конструкції, уникнення зон теплових деформацій та робота з деталями складної просторової форми. Метою дослідження є обґрунтувати та розробити науково-методичний підхід до вибору оптимальної кінематичної схеми багатоосевого маніпулятора для процесів лазерного зварювання, який забезпечує необхідну точність позиціонування, жорсткість конструкції та ефективність технологічного процесу з урахуванням особливостей зварювання виробів складної геометрії та вимог сучасного автоматизованого виробництва. У роботі проведено аналіз сучасних конструкцій промислових роботів, включаючи серійні, паралельні та гібридні кінематичні структури. Розглянуто вплив кількості ступенів свободи, конфігурації ланок та розташування приводів на робочу зону, точність та динамічні характеристики маніпулятора. Запропоновано систему критеріїв оцінювання, яка включає технологічні, конструктивні та експлуатаційні показники. Для перевірки запропонованих рішень використано методи комп'ютерного моделювання, що дозволили оцінити кінематичні та силові параметри різних варіантів конструкцій. Результати дослідження показали, що оптимізація кінематичної структури дає змогу підвищити точність позиціонування та знизити енерговитрати, а також забезпечити стабільність процесу формування зварного шва. Розроблений підхід може бути використаний на етапі проєктування роботизованих комплексів для лазерного зварювання у машинобудівній, авіаційній та автомобільній галузях. Практична значущість роботи полягає у можливості створення конкурентоспроможних систем автоматизованого зварювання з покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: лазерне зварювання, багатоосевий маніпулятор, кінематична схема, робототехнічні системи, точність позиціонування.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції у виробництві характеризуються зростанням вимог до якості зварних з'єднань, підвищенням продуктивності та гнучкості технологічних процесів. Лазерне зварювання завдяки високій точності, мінімальній зоні термічного впливу та можливості автоматизації, широко застосовується у приладобудуванні, авіаційній та автомобільній промисловості. Однак ефективність цього процесу значною мірою залежить від вибору конструкції та кінематичної схеми маніпулятора, що забезпечує точне позиціонування лазерного випромінювача у просторі.

Вибір кінематичної схеми багатоосевого маніпулятора є складною інженерною задачею, яка вимагає врахування ряду суперечливих факторів: необхідної кількості ступенів свободи, габаритних обмежень, робочої зони, динамічних характеристик, точності та жорсткості конструкції. Традиційні підходи часто базуються на використанні стандартних промислових роботів, які не завжди оптимально пристосовані до специфіки лазерного зварювання, зокрема при зварюванні складнопрофільних деталей або великогабаритних виробів. Це призводить до перевитрат енергії, зниження точності позиціонування та збільшення вартості обладнання.

Відсутність чітких методик вибору оптимальної кінематичної структури ускладнює процес проєктування роботизованих систем для лазерного зварювання. У наукових дослідженнях пере-

важає розгляд окремих аспектів, наприклад, динамічних характеристик або алгоритмів керування, тоді як комплексний підхід до аналізу та вибору кінематичної схеми залишається недостатньо розробленим. Це створює науково-технічну проблему, яка полягає у необхідності розроблення методики та критеріїв для визначення оптимальної кінематичної структури багатоосевого маніпулятора з урахуванням вимог процесу лазерного зварювання.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена потребою у підвищенні точності та ефективності лазерного зварювання шляхом обґрунтованого вибору кінематичної схеми маніпулятора, що дозволить створювати конкурентоспроможні роботизовані системи для сучасного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень показує, що наукова спільнота переходить від традиційного вибору виключно серійних роботів до більш гібридних підходів, які поєднують серійні та паралельні кінематичні ланцюги з метою одночасного забезпечення великої робочої зони та підвищеної жорсткості й точності – це підтверджують огляди останніх років [1, с. 7-9; 2, с. 1685-1687; 3, с. 1-2].

Зростає увага до проєктування паралельно-серійних (hybrid) маніпуляторів і квазі-серійних архітектур, як компромісу між досяжністю та характеристиками жорсткості конструкції, що особливо важливо для лазерного зварювання, де критичні і точність позиціонування, і стабіль-

ність термічного впливу [4, с. 223-224; 5, с. 1-2; 6, с. 5966-5967].

Одночасно інтенсивно розвиваються методи моделювання та ідентифікації жорсткості конструкцій (FEA, VJM та ін.), які дозволяють прогнозувати деформації під навантаженням і компенсувати похибки позиціонування – ключовий аспект для збереження якості зварних швів [7, с. 3-6; 8, с. 1633; 9, с. 11-12].

У галузі планування траєкторій і керування помітним є зсув у бік підходів, що враховують надмірність кінематики й використовують сучасні алгоритми (оптимізація, гібридні методи, глибоке навчання) для безколізійного, гладкого та енергоефективного руху з підтримкою стабільного формування шва [10, с. 1900-1901; 11, с. 1-2].

Нарешті, роботи з глобальних методів зворотної кінематики та оптимізації руху для надмірних систем демонструють практичні шляхи інтеграції додаткових ступенів свободи з критеріями мінімізації енерговитрат і мінімізації торсійних навантажень на вузли, що важливо при проектуванні багатоосевих маніпуляторів для лазерного зварювання [12, с. 2-3].

Таким чином, сучасна література орієнтована на комплексний підхід: архітектурні інновації (гібриди), точне моделювання жорсткості, та інтелектуальні методи планування – всі ці напрями мають пряме відношення до проблеми вибору кінематичної схеми для завдань лазерного зварювання.

Мета статті – обґрунтувати та розробити науково-методичний підхід до вибору оптимальної кінематичної схеми багатоосевого маніпулятора для процесів лазерного зварювання, який забезпечує необхідну точність позиціонування, жорсткість конструкції та ефективність технологічного процесу з урахуванням особливостей зварювання виробів складної геометрії та вимог сучасного автоматизованого виробництва.

Виклад основного матеріалу. Кінематика маніпулятора – одна з основних його характеристик. Використовуючи принцип системного підходу, здійснимо синтез структури маніпуляторів, визначимо їхні функціональні можливості. Все це дозволить обрати таку конструкцію маніпулятора, яка забезпечить оптимальні, за потрібними критеріями, умови взаємодії підсистем «робот – інструмент – оброблюваний матеріал».

Серед значного розмаїття компоновань маніпуляторів можна виділити шість основних, найбільш часто застосованих: сферичне, важільне, горизонтальне, порталне, консольне і декартове.

Серед усіх, саме декартове компоновання відрізняється відносно високою жорсткістю й точністю.

Схема маніпулятора виконана таким чином, що три координати X, Y, Z несуть на собі дві поворотні осі B і C. Кінематична модель маніпулятора представлена на рис.1. Точність просторового положення інструмента (горловини сфокусованого лазерного пучка) визначається сукупною точністю декартових координат X, Y, Z і координат обертання B і C.

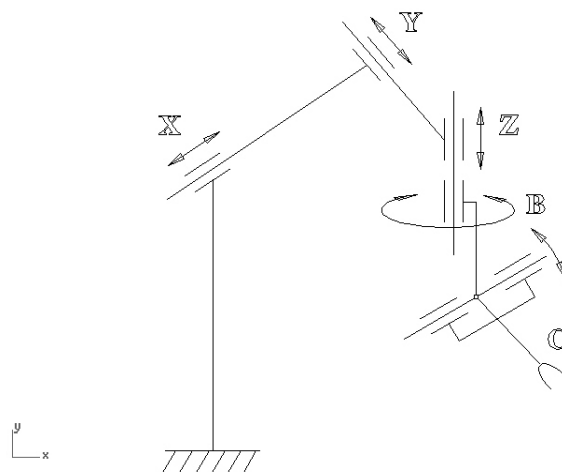


Рис. 1. Кінематична модель лазерного маніпулятора, виконаного за принципом антропоморфного робота

Точність позиціонування промислового робота – одна з найважливіших технічних характеристик, яка у значній мірі визначає можливість використання маніпулятора для автоматизації виробничого процесу й галузь його застосування.

Кількісною величиною, що визначає точність позиціонування маніпулятора, є похибка позиціонування, що становить різницю між фактичним положенням умовної точки робочого органу й точкою, заданою програмою. Як вже говорилося вище, положення умовної точки робочого органу можна визначити, використовуючи лише три ступені волі, тому й похибки позиціонування можуть виражатися лінійними величинами Δx , Δy і Δz . Ці похибки характерні для декартової моделі. Причому

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_1 - x_0; \\ \Delta y &= y_1 - y_0; \\ \Delta z &= z_1 - z_0;\end{aligned}\tag{1}$$

де x_1 , y_1 , z_1 фактичне положення умовної точки робочого органу, а x_0 , y_0 , z_0 її програмні координати.

У випадку використання поворотних або важільних пар, то виникають похибки орієнтування робочого органу в просторі.

Основними причинами виникнення похибок позиціювання є: помилки за рахунок пристроїв керування; помилки за рахунок приводів; помилки за рахунок технологічних погрешностей вузлів й елементів маніпулятора; помилки, обумовлені пружними властивостями кінематичних ланок маніпулятора; помилки за рахунок люфтів і зазорів у кінематичних парах.

Варто виділити похибки, що залежать від умов експлуатації промислового робота: погрешності, пов'язані зі зміною температури навколишнього середовища, ступеня забруднення тертьових поверхонь і т.п.; погрешності, викликані зміною лінійного й кругового переміщень маніпулятора. Очевидно, що при збільшенні радіуса кінематичної пари обертання при постійній кутовій погрешності лінійна погрешність буде збільшуватися пропорційно цьому радіусу; погрешності, викликані переміщенням маси утримуваного робочого органу. Це порозумівається зміною динамічних характеристик системи позиціювання, перехідних процесів, збільшенням вібрації.

Розглянемо кінематичну модель лазерного маніпулятора, який становить собою антропоморфний робот, з погляду виникаючих у ній похибок переміщення. Ефект впливу кожної з первинних похибок визначається незалежно від впливу інших помилок, а їхній сумарний вплив на точність позиціювання обчислюється відповідно до існуючих теорій точності. Визначення помилки положення робочого органу як ланки просторового, розімкненого багатоланкового механізму і її розподіл у робочому просторі маніпулятора є специфічним завданням теорії маніпуляційних систем. Нас же цікавить максимально можлива похибка положення при відпрацюванні даним маніпулятором відповідного завдання.

Вираження (1) описують похибки позиціювання, що виникають при виводі в задану точку координатами X, Y, Z поворотних осей B і C . Робочий орган або інструмент, у нашому випадку сфокусована горловина лазерного пучка, крім декартових координат переміщається ще й цими поворотними осями, завдання яких – відхилити оптичну вісь сфокусованого лазерного пучка на заданий кут. Похибку відхилення оптичної осі можна описати як:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= \alpha_1 - \alpha_0; \\ \Delta\beta &= \beta_1 - \beta_0;\end{aligned}\quad (2)$$

де α і β кути повороту відповідно осей B і C . При цьому, похибка положення інструменту визначається як:

$$\begin{aligned}\Delta b &= \Delta\alpha R_b; \\ \Delta c &= \Delta\beta R_c;\end{aligned}\quad (3)$$

де R_b, R_c – радіуси обертання інструменту відносно осей обертання координат B і C .

Проекції похибок осі B на координати X, Y, Z запишемо як

$$\begin{aligned}\Delta b_x &= \Delta\alpha_x R_b \\ \Delta b_y &= \Delta\alpha_y R_b \\ \Delta b_z &= \Delta\alpha_z R_b\end{aligned}\quad (4)$$

Проекції похибок осі C на координати X, Y, Z

$$\begin{aligned}\Delta c_x &= \Delta\beta_x R_c \\ \Delta c_y &= \Delta\beta_y R_c \\ \Delta c_z &= \Delta\beta_z R_c\end{aligned}\quad (5)$$

Тоді максимальна похибка вектору положення, з урахуванням виразу $\overline{P_1P_2} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ (траєкторія переміщення P_1P_2 у декартовій системі координат, що забезпечується за рахунок сукупності лінійних прирощень $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ за відповідними координатами), визначається як

$$\begin{aligned}\overline{\Delta P_1P_2} &= \sqrt{(\Delta x + \Delta b_x + \Delta c_x)^2 + \\ &+ (\Delta y + \Delta b_y + \Delta c_y)^2 + (\Delta z + \Delta b_z + \Delta c_z)^2}\end{aligned}\quad (6)$$

Із виразу (6) видно, що точність просторового положення інструменту визначається сукупною точністю декартових координат X, Y, Z і координат обертання B і C .

В результаті у маніпуляторі, який ми аналізуємо, при точності позиціювання за координатами $X, Y, Z \pm 0,03$ мм і за координатами B і $C \pm 0,015^\circ$, просторова точність положення інструменту становить всього $\pm 0,08$ мм.

Розроблювальний маніпулятор повинен виконувати наступні завдання: – забезпечувати просторовий рух інструмента (горловини сфокусованого пучка) в просторі з розмірами $500 \times 500 \times 100$ мм; забезпечувати нахил оптичної осі у напівсфері з максимальним відхиленням про вертикалі $\pm 45^\circ$. При цьому схема повинна відповідати наступним вимогам: при здійсненні кругових рухів у будь-який площині об'єктів не повинен обертатися навколо своєї осі; при будь-якому відхиленні оптичної осі координатами B і C положення горловини сфокусованого пучка щодо координат повинне залишатися X, Y, Z незмінним.

Оскільки в будь-яку точку робочого простору, який обмежено кінетичними можливостями маніпулятора, можна потрапити, використовуючи тільки три ступені волі. Тому для виконання завдання переміщення інструмента по заданій траєкторії в просторі, за умови фіксованого його положення щодо трьох координат X, Y, Z при довільному положенні координат B і C , досить лише мінімальної конфігурації маніпулятора.

Кінематична модель п'ятикоординатного маніпулятора, у якій розкривається схема взаємного положення координат X, Y, Z, що переміщують інструмент і координат B і C, що відхиляють оптичну вісь, показана маніпулятора на рис. 2.

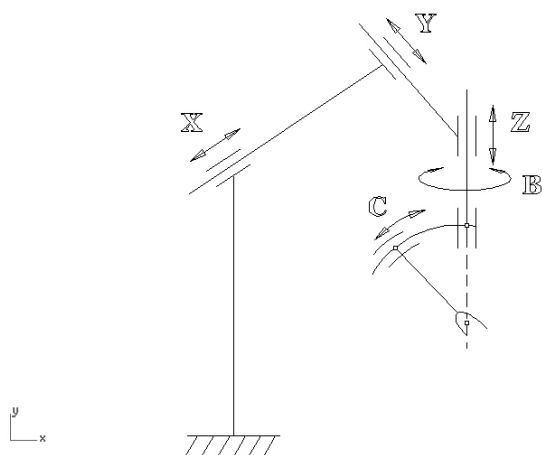


Рис. 2. Кінематична модель п'ятикоординатного маніпулятора з підвищеною точністю положення інструменту

Система декартових координат X, Y, Z, переміщає в просторі по керуючій програмі координати B і C, що відхиляють, які по тій же програмі, узгоджено з координатами X, Y, Z, забезпечують нахил і поворот оптичної осі. Слід зазначити, що координати B і C виконані таким чином, що їхній рух не міняє положення інструмента в просторі, а тільки відхиляє оптичну вісь. У цьому випадку похибка вектору просторового положення робочого органу визначається як

$$\Delta P_1 P_2 = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (7)$$

У порівнянні з (7) видно, що у розробленій моделі точність просторового положення інструменту вища. При цьому похибки відхилю оптичної осі лишилися на попередньому рівні.

Використовуючи принцип децентралізації керування об'єктами з багатьма зв'язками, із однозв'язковими підсистемами, керування таким маніпулятором зводиться до регулювання просторового положення інструмента в трьохкоординатній траєкторній підсистемі й регулюванню кута нахилу у двохкоординатній підсистемі, що відхиляє. Підсистеми однозначно зв'язані між собою загальним законом керування.

Аналіз розглянутих кінематичних моделей показує, що наявність обертових координат приводить до появи погрішності просторового відхилення оптичної осі, обумовленої похибками положення поворотних осей.

Розроблювана нами модель п'ятикоординатного маніпулятора повинна бути постачена такою підсистемою, що відхиляє фокусуючу систему, яка буде реалізована на дуговому русі (рис. 3).

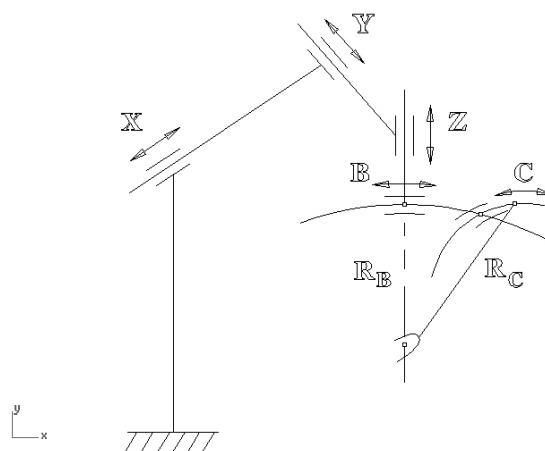


Рис. 3. Кінематична модель п'ятикоординатного маніпулятора з підвищеною точністю відхилення оптичної осі

В такій системі осі B і C нахиляють оптичну вісь у перпендикулярних напрямках. У цьому випадку одна з осей, наприклад вісь B, переміщає перпендикулярну їй вісь C. Причому обидві осі, що відхиляють, рухаються по дугах, що можливо мають різний радіус, але один центр, що мають, що перебувати в точці положення інструмента.

Похибка відхилення оптичної осі визначається як

$$\Delta \alpha = \Delta b / R_b; \quad (8)$$

$$\Delta \beta = \Delta c / R_c$$

де Δb і Δc – похибки переміщення координат B і C, відповідно, R_b , R_c – радіуси обертів відхиляючої осі координат B і C.

Отже, просторова похибка відхилення оптичної осі зменшилася пропорційно радіусу.

Для виконання зварювальних робіт необхідним є комплекс устаткування, яке забезпечує автоматичне одержання швів заданої якості і конфігурації. У залежності від технологічних схем зварювання із застосуванням лазерного випромінювача до цього устаткування пред'являються численні вимоги, насамперед обумовлені змістом таких схем.

Лазерний випромінювач найчастіше застосовується в установках, що працюють в автоматичному режимі. Це викликано високою продуктивністю лазерного комплексу. Зазвичай автоматизовані лазерні установки повинні: транспортувати лазерний пучок у зону зварювання; фокусувати лазерний пучок на крайки заготовки, що зварюється; захищати зону зварювання від

повітря; подавати в зону зварювання присаджувальний матеріал зі швидкістю, яка не перевищує швидкість його плавлення; переміщати сфокусований пучок уздовж крайок; забезпечувати точну підтримку співвідношення потужності випромінювання і швидкості переміщення пучка уздовж крайок; забезпечувати точне влучення пучка на крайки при переміщенні; забезпечувати підтримку положення фокуса на крайках при переміщенні; для лазерно-дугової схеми зварювання, подавати в зону зварювання плавкий електрод або присаджувальний дріт з необхідною швидкістю, управляти зварювальним струмом тощо. Крім того, до складу лазерних установок входять технологічні пристосування, які утримують заготовки в процесі зварювання.

Таким чином, до складу узагальненого пристрою, що реалізує лазерну і лазерно-дугову схеми, повинні входити: лазерний випромінювач; оптична система транспортування лазерного пучка; об'єктив або лазерна зварювальна головка; пристрій подачі присаджувального матеріалу; маніпулятор; механізми забезпечення положення фокусної відстані; механізм подачі електрода; технологічні пристосування втримання заготовок. З аналізу такої моделі випливає, що основними її вузлами є електричний привід, різні функціональні перетворювачі (цифрові і цифро-аналогові), елементи визначення стику і температури. Такі параметри зварювального маніпулятора, як точність, швидкодія, надійність і енерговитрати залежать від цих вузлів. Для проектування застосовували прикладний пакет програм Solidworks і Autodesk Inventor.

Розглянемо більш детально запропоновану конструкцію багатокоординатного маніпулятора. Як відмічалось, застосування універсальних антропоморфних роботів для розв'язання низки задач лазерного різання і зварювання складнопрофільних конструкцій є надмірним у разі розв'язання окремих задач серійного виробництва. З метою зниження собівартості маніпулятора нами пропонується для вирішення певних технологічних задач замінити п'яти- чи шістьохкоординатний антропоморфний робот трикоординатним порталним маніпулятором, постаченим системою кутового нахилу робочого інструменту, згідно кінематичній семі рис. 3. Таким чином, представлений вищенаведеними кінематичною схемою (рис. 3) й моделлю (рис. 4.а) маніпулятор скла-

дається із двох підсистем: трикоординатна, що забезпечує переміщення точки положення інструмента в просторі, й двокоординатна – яка відхиляє оптичну вісь. Загальний вигляд конструкції виготовленого за даною розробкою маніпулятора наведено на рис. 4.б.

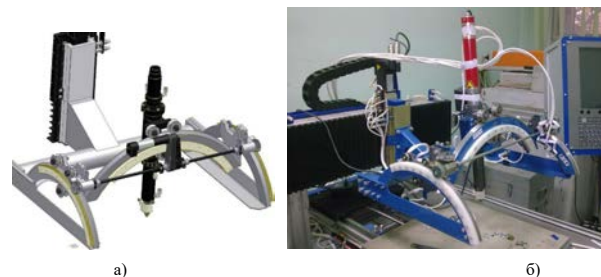


Рис. 4. Дугова відхиляюча підсистема: а – спроектована модель; б – виготовлений дослідний зразок

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що вибір кінематичної схеми багатоосового маніпулятора є ключовим фактором, який визначає ефективність і якість процесів лазерного зварювання. Від правильної конфігурації механізму залежать точність позиціонування інструмента, стабільність швидкості руху та можливість обробки деталей складної просторової форми.

Проведений аналіз існуючих конструкцій показав, що серійні маніпулятори характеризуються широкою робочою зоною, проте мають нижчу жорсткість та точність, у той час як паралельні схеми забезпечують високу точність і динамічні властивості, але обмежені у досяжності. Найбільш перспективними виявилися гібридні кінематичні структури, які поєднують переваги обох типів механізмів.

Запропоновано систему критеріїв оцінювання кінематичних схем, яка враховує технологічні (точність, стабільність процесу, плавність руху), конструктивні (жорсткість, масо-габаритні характеристики) та експлуатаційні (енергоефективність, ремонтпридатність) параметри. Використання комплексного підходу дозволяє обґрунтовано обирати оптимальну конфігурацію маніпулятора для конкретних виробничих завдань.

Результати дослідження створюють наукову основу для подальшої оптимізації роботизованих систем лазерного зварювання та впровадження інноваційних технічних рішень у промисловість.

Список літератури:

1. Russo M., Zhang D., Liu X. J., Xie Z. A review of parallel kinematic machine tools: Design, modeling, and applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2024. Vol. 196. Id. 104118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104118>

2. Ye W., Tang T., Li Q. Robotized manufacturing equipment: A review from the perspective of mechanism topology. *Science China Technological Sciences*. 2023. Vol. 66. Iss. 6. P. 1683–1697. URL: <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2349-7>
3. Kumar S., Wöhrle H., de Gea Fernández J., Müller A., Kirchner F. A survey on modularity and distributivity in series-parallel hybrid robots. *Mechatronics*. 2020. Vol. 68. Id. 102367. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102367>
4. Fajardo-Pruna M., López-Estrada L., Pérez H., Diez E., Vizán A. Analysis of a single-edge micro cutting process in a hybrid parallel-serial machine tool. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 151. P. 222–235. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.023>
5. Abarca, V., Elias, D. A review of parallel robots: Rehabilitation, assistance, and humanoid applications for neck, shoulder, wrist, hip, and ankle joints. *Robotics*. 2023. Vol. 12. Iss. 5. Id. 131. URL: <https://doi.org/10.3390/robotics12050131>
6. Shi M., Li H., Li S., Qin X., Liu H. A rapid prediction method for the stiffness and the machining accuracy evaluation of a parallel kinematic mechanism. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2023. Vol. 37. Iss. 11. P. 5965–5978. URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-023-1033-1>
7. Wu K., Li J., Zhao H., Zhong Y. Review of industrial robot stiffness identification and modelling. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 17. Id. 8719. URL: <https://doi.org/10.3390/app12178719>
8. Kim S., Nam E., Ha T., Hwang S., Lee J., Park S., Min B. Robotic machining: A review of recent progress. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. Vol. 20. Iss. 9. P. 1629–1642. URL: <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00187-w>
9. Cao W., Ding H. A method for stiffness modeling of 3R2T overconstrained parallel robotic mechanisms based on screw theory and strain energy. *Precision Engineering*. 2018. Vol. 51. P. 10–29. URL: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.07.002>
10. Zhong J., Wang T., Cheng L. Collision-free path planning for welding manipulator via hybrid algorithm of deep reinforcement learning and inverse kinematics. *Complex & Intelligent Systems*. 2022. Vol. 8. Iss. 3. P. 1899–1912. URL: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00366-1>
11. Gao W., Tang Q., Yao J., Yang Y. Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 62. Id. 101862. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101862>
12. Tringali A., Cocuzza, S. Globally optimal inverse kinematics method for a redundant robot manipulator with linear and nonlinear constraints. *Robotics*. 2020. Vol. 9. Iss. 3. Id. 61. <https://doi.org/10.3390/robotics9030061>

Lukashenko V.A., Bernatskyi A.V., Bondarieva V.I., Harder D.A., Nabok T.M., Kurylo V.A., Batsak A.M., Hryn A.P., Lukashenko V.M. SELECTION OF THE OPTIMAL KINEMATIC SCHEME OF A MULTI-AXIS MANIPULATOR FOR LASER WELDING PROCESSES

In modern mechanical engineering and high-tech production, laser welding occupies a leading position due to its advantages – high accuracy, minimal heat-affected zone, automation capabilities and ensuring high quality of welded joints. One of the key elements of robotic laser welding systems is a multi-axis manipulator, which provides spatial positioning of the laser emitter. The accuracy, reliability and efficiency of the entire process depend on the choice of its kinematic scheme. However, today there is no universal method that allows reasonably determining the optimal structure of the manipulator taking into account the specific requirements of laser welding, such as stability of movement speed, structural rigidity, avoidance of thermal deformation zones and work with parts of complex spatial shape. The purpose of the study is to substantiate and develop a scientific and methodological approach to choosing the optimal kinematic scheme of a multi-axis manipulator for laser welding processes, which provides the necessary positioning accuracy, structural rigidity and efficiency of the technological process, taking into account the features of welding products of complex geometry and the requirements of modern automated production. The paper analyzes modern designs of industrial robots, including serial, parallel and hybrid kinematic structures. The influence of the number of degrees of freedom, configuration of links and location of drives on the working area, accuracy and dynamic characteristics of the manipulator is considered. A system of evaluation criteria is proposed, which includes technological, structural and operational indicators. To verify the proposed solutions, computer modeling methods were used, which allowed to evaluate the kinematic and power parameters of various design options. The results of the study showed that optimizing the kinematic structure makes it possible to increase positioning accuracy and reduce energy consumption, as well as ensure the stability of the weld formation process. The developed approach can be used at the design stage of robotic complexes for laser welding in the mechanical engineering, aviation and automotive industries. The practical significance of the work lies in the possibility of creating competitive automated welding systems with improved technical and economic indicators.

Key words: laser welding, multi-axis manipulator, kinematic diagram, robotic systems, positioning accuracy.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 13.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.11:621.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/02>

Немченко М.В.

експерт з розвитку та управління сільськогосподарським бізнесом

РОБОТА СТІЧКОВИХ ТРАНСПОРТЕРІВ ПРИ ПЕРЕМІЩЕННІ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР: ВПЛИВ НА ЗБЕРЕЖЕННЯ МАСИ ТА ЯКІСТЬ ЗЕРНА

У статті досліджено забезпечення збереження маси та якісних характеристик зернових культур під час внутрішнього переміщення на елеваторних та переробних підприємствах, що є важливою умовою ефективної післязбиральної логістики. Особлива увага приділена стрічковим транспортерам, які забезпечують безперервне переміщення зерна на різних етапах технологічного циклу. Незважаючи на їхнє широке застосування, вплив конструкційних параметрів, режимів роботи та експлуатаційних навантажень стрічкових конвеєрів на втрати маси та деградацію якості зерна в умовах тривалого або інтенсивного транспортування досі недостатньо вивчений.

У межах проведеного дослідження здійснено системний аналіз технологічних характеристик стрічкових транспортерів, зокрема типів стрічок, швидкісних режимів, конфігурацій завантаження та розвантаження, а також способів запобігання механічним пошкодженням зерна. Проведено теоретичне обґрунтування та експериментальне моделювання впливу цих параметрів на ступінь деградації оболонки, зміну вологості, а також активацію процесів самозігрівання при транспортуванні зернових культур. Окрему увагу приділено питанням контролю накопичення пилу, змішування партій різної якості та утворення осередків локальної конденсації в транспортних ланках.

Встановлено, що оптимізація конструктивних елементів стрічкових транспортерів, таких як тип і жорсткість стрічки, форма завантажувальних лотків, параметри натягу та обмеження швидкості руху, у поєднанні з коректно підібраними експлуатаційними режимами – зокрема кутами нахилу та тривалістю безперервної роботи – дозволяє мінімізувати втрати маси зерна на рівні 1,1–1,4% порівняно з типовими промисловими умовами. За таких параметрів також спостерігалось суттєве зменшення частки травмованого зерна, включаючи механічні ушкодження оболонки, зародкової частини та кінчиків, до показників, що відповідають вимогам нормативів зберігання. Дослідження здійснювалося з урахуванням результатів польових випробувань і лабораторних аналізів на партіях пшениці, кукурудзи та ячменю, які переміщувалися в межах різних виробничих ділянок за стандартними та експериментально зміненими схемами транспортування. Результати підтвердили доцільність технічного регулювання режимів роботи конвеєрів відповідно до фізико-механічних властивостей конкретних культур. Практична значущість отриманих даних полягає у можливості їх використання при модернізації існуючих елеваторних систем, оптимізації внутрішньоцехової логістики та впровадженні технічних рішень для зменшення втрат і забезпечення стабільності якісних показників зерна протягом усього технологічного процесу переміщення.

Ключові слова: стрічкові транспортери, переміщення зерна, збереження маси, якість зернових, механічні пошкодження, транспортувальна логістика, експлуатаційні режими.

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсифікації післязбиральної логістики зернових культур зростає потреба в підвищенні ефективності внутрішнього транспортування сільськогосподарської продукції, зокрема в межах елеваторних та переробних підприємств. Одним

із ключових елементів цього процесу є стрічкові конвеєри, які забезпечують безперервний рух зерна між технологічними вузлами. Проте навіть за правильно організованої системи переміщення залишаються ризики втрат маси та зниження якості зерна внаслідок механічних пошкоджень,

© Немченко М.В., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

підвищеної вологості, пілогенерації чи змішування партій різної кондиції. Зниження втрат і забезпечення стабільності якісних показників зерна потребують глибокого розуміння впливу конструкційних та експлуатаційних параметрів стрічкових транспортерів на фізико-механічний стан культур під час руху. Особливої актуальності набуває дослідження режимів переміщення з урахуванням типу зерна, тривалості контакту з поверхнею транспортерної стрічки, кутів нахилу та швидкості руху. Відсутність адаптивних параметрів у роботі транспортних систем часто стає причиною деструкції оболонок, підвищеного травмування зерна й активізації процесів самозігрівання у транспортованій масі [1, с. 75]. У зв'язку з цим виникає необхідність у створенні модифікованих підходів до оцінювання та регулювання технічних характеристик стрічкових конвеєрів з метою збереження якості зерна та зменшення технологічних втрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років посилюється науковий інтерес до вивчення техніко-технологічних параметрів стрічкових транспортерів у системах післязбиральної обробки зернових культур. Основну увагу приділено питанням оптимізації конструкції стрічок, зменшення механічного травмування зерна під час транспортування, а також впливу експлуатаційних режимів на фізико-хімічні характеристики зернової маси.

У роботі [1] обґрунтовано технологічні підходи до удосконалення процесу транспортування зерна в межах післязбиральної обробки, зокрема через модифікацію конструктивних елементів стрічкових конвеєрів і врахування особливостей взаємодії зерна з рухомими поверхнями. Автори наголошують, що недосконале налаштування параметрів переміщення призводить до перевищення нормованих втрат маси, підвищеного пилоутворення та зміни вологості зерна. У дослідженні також запропоновано практичні рекомендації щодо покращення умов подачі зернового матеріалу в транспортні системи з метою зменшення травмування.

Публікація [2] зосереджена на вивченні окремих конструктивних елементів обладнання для зберігання зерна, у тому числі вузлів, пов'язаних із переміщенням. Робота [3] аналізує процеси механічної дії на зернову масу під час транспортування та пропонує методи мінімізації руйнувань зерна на етапах завантаження та розвантаження. У роботах [4; 5] розглянуто загальні схеми післязбирального оброблення зернових культур,

зокрема фокус зроблено на інтеграції стрічкових конвеєрів у технологічні ланцюги з урахуванням енергетичних витрат та збереження якості.

У публікаціях [6; 7] проведено числове моделювання параметрів транспортувальних систем і визначено оптимальні режими роботи стрічкових транспортерів з урахуванням маси навантаження, кутів нахилу та швидкості руху стрічки. Робота [8] систематизує підходи до сушіння зерна, в яких також фіксується вплив переміщення на рівномірність вологості. У статті [9] детально розглянуто впровадження технологічних ліній захисту зерна від травмування під час транспортування, що підтверджує актуальність розробки спеціалізованих технічних рішень.

У роботах [10; 11; 12] представлено результати досліджень систем подачі насіння в пристроях стрічкового типу високошвидкісного спрямування. Проведено розрахунки та натурні експерименти з моделюванням пошкоджуваності зерна за різних схем і режимів подачі, що підтверджує доцільність застосування математичних моделей для прогнозування ефективності транспортування.

Попри наявність широкого спектра публікацій, більшість з них фрагментарно розглядають вплив експлуатаційних параметрів стрічкових транспортерів на комплексні показники якості зерна. У низці робіт акцент зроблено на локальних аспектах (механічне руйнування, зміна вологості або пилоутворення), однак бракує узагальнених досліджень, які б комплексно оцінювали весь спектр деградаційних змін у зерні під час його транспортування на різних етапах технологічного циклу. Залишається недостатньо вивченим питання розробки адаптивних режимів переміщення з урахуванням культуроспецифічних властивостей зерна.

Таким чином, необхідність формалізованої оцінки впливу конструктивно-експлуатаційних параметрів стрічкових конвеєрів на масу та якість зерна, а також впровадження технічних рішень щодо мінімізації втрат у транспортних ланках логістичного процесу визначає актуальність і наукову новизну подальших досліджень у цьому напрямі.

Метою статті є теоретичне обґрунтування, експериментальна перевірка та систематизація впливу конструктивних елементів і режимів роботи стрічкових транспортерів на збереження маси та якісних показників зерна при внутрішньому переміщенні на етапах післязбиральної обробки. Такий підхід розглядається як ефектив-

ний напрям зменшення технологічних втрат, запобігання механічному пошкодженню зернової маси та стабілізації параметрів вологості під час транспортування в межах елеваторних і переробних потужностей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку конкретних завдань: проаналізувати вплив типу та жорсткості транспортерної стрічки, конфігурації завантажувальних і розвантажувальних вузлів, а також параметрів натягу на зміну маси зернової продукції під час транспортування; дослідити характер і масштаб механічних ушкоджень зерна залежно від швидкості руху стрічки, кута нахилу транспортера та тривалості безперервної експлуатації; встановити залежність між режимами транспортування та показниками вологості, рівнем пилоутворення та потенціалом самозігрівання в зерновій товщі; узагальнити результати лабораторних і польових випробувань на прикладі зерна пшениці, кукурудзи та ячменю для формування технічних рекомендацій щодо проектування безпечних внутрішніх маршрутів переміщення продукції; обґрунтувати доцільність впровадження автоматизованих систем моніторингу стану зерна на основі критичних параметрів збереження в процесі його транспортування стрічковими конвеєрами.

Виконання вказаних завдань дозволить сформулювати інженерно обґрунтовані підходи до модернізації транспортувальних систем з урахуванням специфіки зернових культур і вимог до довгострокового зберігання.

Виклад основного матеріалу. У контексті підвищення ефективності внутрішнього транспортування зернових культур особливого значення набуває вивчення впливу конструктивних та режимних параметрів стрічкових транспортерів на збереження маси та якісних характеристик продукції. Такий підхід зумовлений необхідністю мінімізації технологічних втрат на етапах післязбиральної обробки, де переміщення зерна здійснюється на значних відстанях і під постійним навантаженням. Основними механізмами деградації є механічне травмування зерна внаслідок тертя, ударів та зминання, нерівномірне випаровування вологи через підвищене теплонакопичення, а також утворення осередків пилоутворення, що супроводжується частковим розшаруванням зернової маси [2, с. 72–74].

Найбільш чутливими параметрами, що безпосередньо впливають на збереження цілісності зерна, виявилися: тип і товщина транспортерної

стрічки, форма жолоба, конструкція завантажувального вузла, режим натягу, швидкість руху стрічки та геометрія транспортної траєкторії. Для оцінки впливу цих факторів було проведено серію лабораторних та виробничих випробувань, у межах яких досліджувалися партії пшениці, кукурудзи та ячменю. Переміщення здійснювалося за типових і експериментально модифікованих схем, що включали горизонтальні та похилі ділянки, різну кількість перегинів, а також варіації кутів нахилу (5° – 25°) та швидкості руху стрічки (від 0,3 до 1,2 м/с).

Встановлено, що при швидкості транспортування понад 0,9 м/с і куті нахилу понад 15° спостерігається зростання частки битого зерна на 1,1–1,4% порівняно з базовими умовами (до 0,6 м/с, кут до 10°). При цьому найвищий ступінь пошкодження зафіксовано у партіях кукурудзи, що пояснюється меншою щільністю та більшою масою 1000 зернин. Паралельно із пошкодженням оболонок виявлено зниження середньої вологості зернової маси на 0,3–0,7% через локальне перегрівання при тривалому контакті зі стрічкою на ділянках з великим коефіцієнтом тертя. Умови транспортування без використання амортизуючих вставок або гумових обкладок призводили до підвищення рівня пилоутворення, що особливо небезпечно при обробці вологого зерна (вологість понад 15%), де частинки пилу слугують осередками конденсації.

Оцінка впливу натягу стрічки засвідчила, що при перевищенні нормативного значення натягу на 15–20% зростає деформація контактної сфери зерна, що проявляється в мікротріщинах зародкового шару, які не виявляються під час візуального контролю, але погіршують схожість. Аналогічно, при недостатньому натягу відбувається локальне накопичення зерна в жолобі, що призводить до стискання нижніх шарів і підвищеного стирання оболонок [3, с. 227; 4, с. 61–63].

Ці результати підтверджуються дослідженнями, що висвітлюють критичну роль контролю натягу стрічки у транспортних системах післязбиральної обробки зернових, зокрема в умовах переміщення чутливих до травмування культур. Надмірний натяг посилює тертя між стрічкою та зерною масою, що сприяє механічним пошкодженням і підвищенню температури в зоні контакту, що, своєю чергою, активує біохімічні процеси у вологому зерні [5, с. 92–94].

Результати експериментального моделювання свідчать, що некоректно заданий натяг також зумовлює нерівномірність подачі зерна, створюю-

ючи зони локального навантаження й підвищеного тиску на нижні шари. Особливо небезпечним є поєднання надмірного натягу зі зношеною поверхнею жолоба або відсутністю напрямних, що призводить до хаотичного руху зернової маси та зниження однорідності потоку [6, с. 33–34].

Додатково встановлено, що нестабільний або недостатній натяг стрічки негативно впливає не лише на фізичний стан зерна, а й на точність обліку його переміщення в автоматизованих системах моніторингу, особливо у випадку транспортування вологих або незернових культур. Це свідчить про широку інженерну значущість параметра натягу як критичного фактору якості та керованості післязбиральних процесів [7, с. 68–70].

У процесі експериментального моделювання було апробовано конструкцію змінного завантажувального лотка зі змінюваним кутом падіння зерна (від 25° до 70°). Результати показали, що

при зменшенні кута до 35° частка пошкодженого зерна знижується на 0,8–1,0%, що зумовлено зменшенням вертикального прискорення при падінні зерна на стрічку. Додаткове використання напрямних перегородок дозволяло уникати турбулентного руху зернової маси на ділянках розвантаження, що також сприяє зниженню пилоутворення на 12–17% [8, с. 560–562; 9, с. 1–2].

Умови транспортування з боковою вентиляцією, що створює невеликий повітряний потік уздовж стрічки, продемонстрували стабілізацію температури зернової товщі (зменшення на 1,2–1,7°C порівняно з контрольними зразками), що пригнічує процеси самозігрівання. Такі рішення можуть бути використані при проектуванні стрічкових систем, орієнтованих на транспортування високовологого зерна з мінімальним ризиком мікробіологічного псування [10, с. 128–129; 11, с. 5].

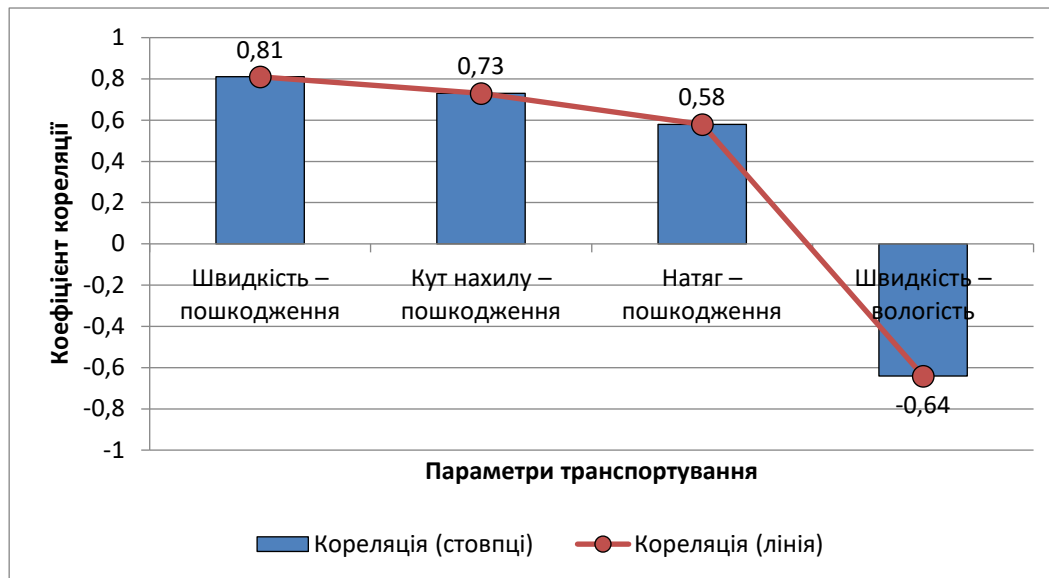


Рис. 1. Кореляційні залежності між параметрами транспортування та показниками втрат зерна

Джерело: побудовано за результатами експериментального моделювання

Таблиця 1

Вплив параметрів транспортування на втрати маси та якість зерна

Параметр транспортування	Межі варіації	Показник пошкодження (%)	Зміна вологості (%)	Примітка
Швидкість стрічки	0,3–1,2 м/с	0,5–2,1	–0,2...–0,7	Вище 0,9 м/с – різке зростання пошкоджень
Кут нахилу	5°–25°	0,4–1,6	Незначна	Впливає при високій вологості
Натяг стрічки	–20 % до +20% від норми	0,3–1,5	–	При недотязу – накопичення зерна
Конструкція лотка	кут падіння 25–70°	0,8–2,2	–	Оптимально 35–45°
Вентиляція бокова	з/без	–	–0,2...–0,5	Стабілізує температуру зерна

Для систематизації отриманих результатів у таблиці 1 наведено вплив окремих параметрів на ключові показники збереження зерна.

Узагальнені дані свідчать про можливість зменшення втрат маси зерна до 1,2–1,8% при впровадженні адаптивних схем транспортування та конструктивній модернізації вузлів подачі й приймання.

З метою наочної інтерпретації впливу основних конструктивно-експлуатаційних параметрів стрічкових транспортерів на цілісність та масу зернової маси побудовано графічну модель кореляційних зв'язків між ключовими змінними.

Як видно з рисунка 1, найбільш суттєвий негативний вплив на пошкоджуваність зерна мають швидкість руху стрічки (коефіцієнт кореляції $r = 0,81$) та кут нахилу транспортера ($r = 0,73$). Водночас помірний зв'язок спостерігається між рівнем натягу та механічними втратами ($r = 0,58$), а також між швидкістю і зниженням вологості ($r = -0,64$), що вказує на частковий ефект зневоднення через локальне теплонакопичення в умовах підвищеного тертя.

На основі експериментальних даних побудовано регресійні моделі, що дозволяють прогнозувати рівень втрат залежно від обраного режиму транспортування. Зокрема, для пшениці сформульовано рівняння регресії другого порядку (1):

$$W_p = 0,94 + 0,83 \cdot V + 0,47 \cdot \alpha - 0,12 \cdot T \quad (1);$$

де W_p – частка пошкодженого зерна (%),

V – швидкість транспортування (м/с),

α – кут нахилу ($^\circ$),

T – час проходження по конвеєру (с).

Рівняння демонструє високу точність апроксимації ($R^2 = 0,87$) у межах швидкостей до 1,0 м/с і кутів до 20° , що дозволяє використовувати модель як основу для автоматизованого регулювання швидкісного режиму залежно від типу культури та температурно-вологісного стану зернової маси.

Паралельний аналіз виявив, що найбільшу стабільність якісних показників забезпечують умови транспортування при швидкості 0,6–0,8 м/с, куті нахилу 10 – 15° та використанні стрічки з полімерною обкладкою (товщина ≥ 6 мм), що забезпечує демпфування ударного навантаження. Такий режим дозволяє зберегти вихід кондиційного зерна на рівні 97,8–98,5 % від початкової маси без проявів самозігрівання, навіть при тривалості транспортування понад 90 секунд.

Поглиблений аналіз отриманих даних підтверджує, що загальний ефект деградації якості

зерна формується не лише внаслідок механічних пошкоджень, а й за рахунок мікрокліматичних змін у зоні транспортування. Зокрема, підвищення температури зернової маси на окремих ділянках транспортерної лінії сприяє запуску ензиматичних процесів, які пришвидшують біохімічне старіння зерна. Такий ефект особливо виражений у разі транспортування високоенергетичних культур, зокрема кукурудзи та сої, де фіксувалося підвищення температури до 32 – 34°C при відсутності вентиляційного супроводу. У випадках, коли час перебування зерна на стрічці перевищував 120 с, відзначено ріст активності каталази та зниження енергії проростання (на 6–9% у порівнянні з контрольними зразками, переміщеними гравітаційно).

Результати мікробіологічного контролю також засвідчили зростання загальної кількості мезофільних аеробних мікроорганізмів (ЗКМАМ) на поверхні зерна після транспортування без системи попереднього очищення, що вказує на необхідність інтеграції фільтраційних елементів або попереднього пиловідведення. У дослідних зразках пшениці після проходження через стрічкові конвеєри зі сталевими поверхнями без гумової обкладки показник ЗКМАМ збільшувався у 1,5–1,8 рази. Ці чинники істотно впливають на стійкість зерна під час зберігання та створюють ризики локального самозігрівання вже на ранніх етапах логістичного ланцюга.

Ще одним важливим спостереженням стало те, що навіть за незначних змін режиму роботи (наприклад, раптових зупинок або запусків транспортерів) рівень пошкодження зерна різко зростає. У таких випадках утворювалися застійні зони, в яких зернова маса піддавалася стисканню та тертю протягом значно тривалішого часу. На ділянках з порушенням графіком подачі або перевантаженням транспортної лінії (перевищення рекомендованої щільності завантаження понад 120 кг/м^2) зафіксовано зростання частки нестандартного зерна до 3,6–4,2%. Це свідчить про критичну необхідність дотримання динамічного балансу між швидкістю подачі та продуктивністю приймальних бункерів [12, с. 9–10].

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що комплексна оптимізація конструктивних і експлуатаційних параметрів стрічкових транспортерів є дієвим засобом підвищення технологічної надійності внутрішньоцехових логістичних систем, мінімізації втрат та стабілізації якісних характеристик зерна ще на етапі транспортування.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило ключовий вплив конструктивних і режимних параметрів стрічкових транспортерів на збереження маси та якісних характеристик зернових культур у процесі внутрішнього транспортування. Результати лабораторних і виробничих випробувань засвідчили, що підвищення швидкості руху стрічки понад 0,9 м/с і збільшення кута нахилу понад 15° спричинює зростання частки битого зерна на 1,1–1,4% порівняно з базовими умовами транспортування. Найбільш вразливою до механічних ушкоджень виявилася кукурудза, що пояснюється її морфометричними особливостями. Паралельно спостерігалось зниження середньої вологості на 0,3–0,7% у зв'язку з локальним перегріванням, особливо в умовах підвищеного тертя стрічки без гумових обкладок.

Доведено, що конструкція завантажувального лотка зі змінюваним кутом падіння зерна суттєво впливає на ступінь пошкодження, зокрема при зниженні кута до 35° частка травмованого зерна зменшилася на 0,8–1,0%. Ефективною також виявилася інтеграція напрямних перегородок, що забезпечувала зниження рівня пилоутворення на 12–17% на ділянках розвантаження. Дослідження експлу-

атаційних режимів підтвердили доцільність використання бокової вентиляції як способу стабілізації температури зернової товщі на рівні 1,2–1,7°C нижче контрольних зразків, що пригнічує процеси самозігрівання, особливо у вологому зерні.

Окрему увагу приділено впливу натягу стрічки: перевищення нормативу на 15–20 % призводило до деформацій мікроструктури зерна, що негативно позначалося на схожості, тоді як недостатній натяг провокував локальне накопичення зернової маси, стискання нижніх шарів і посилене стирання оболонок. Зазначені ефекти підтверджені кореляційними залежностями, отриманими під час експериментального моделювання.

Напрямом подальших досліджень є оптимізація конструкцій транспортних систем з урахуванням типорозмірів зерна, розробка адаптивних режимів транспортування для високовологіх культур та впровадження інтелектуальних систем моніторингу пошкоджень у режимі реального часу. Практична реалізація отриманих результатів дозволить мінімізувати технологічні втрати, підвищити енергоефективність обробки зернової маси та забезпечити стабільність її якісних параметрів на всіх етапах внутрішньої логістики.

Список літератури:

1. Твердохліб І.В., Ковальчук О.О., Спірін А.В., Павленко В.К. Транспортування зерна в процесі його післязбиральної обробки. Вібрації в техніці та технологіях. 2024. № 2(113). С. 75–82. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-8>
2. Левченко Ю.В., Басова Ю.О., Молчанова Н.Ю., Ситник Д.Р. Дослідження конструктивних елементів обладнання для зберігання зерна. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. 2023. №39. С. 70–75. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.10>
3. Farzana W., Vellingiri P. Handling and transportation of food grains. In Unit Operations in Food Grain Processing. Academic Press, 2024. Pp. 215–247 <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18965-4.00008-X>
4. Rosentrater K.A. Overview of storage systems for cereal grains and grain products. In Storage of Cereal Grains and Their Products. Woodhead Publishing, 2022. Pp. 41–80 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812758-2.00013-1>
5. Uebersax M.A., Siddiq M., Cramer J., Bales S. Harvesting, postharvest handling, distribution, and marketing of dry beans. Dry Beans and Pulses: Production, Processing, and Nutrition. 2022. Pp. 81–104. <https://doi.org/10.1002/9781119776802.ch4>
6. Gu F., Zhao Y., Hu Z., Shi L., Wu F., Xu H., Gao X. Operation analysis and parameter optimization of the conveying device for uniform crushed straw throwing and seed-sowing machines. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2023. № 16(6). Pp. 28–36. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231606.7057>
7. Kabir M.S., Gulandaz M.A., Ali M., Reza M.N., Kabir M.S.N., Chung S.O., Han K. Yield monitoring systems for non-grain crops: A review. Korean Journal of Agricultural Science. 2024. № 51(1). № 63–77. <https://doi.org/10.7744/kjoas.2024.51.1.06>
8. Jimoh K.A., Hashim N., Shamsudin R., Man H.C., Jahari M., Onwude D.I. Recent advances in the drying process of grains. Food Engineering Reviews. 2023. № 15(3). Pp. 548–576. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7>
9. Mirskykh R. IMPLEMENTATION OF TRAUMA-PROTECTING TECHNOLOGICAL LINES FOR TRANSPORTATION OF GRAIN CROPS. Grain Products & Mixed Fodder's. 2025. № 25(2). <https://doi.org/10.15673/gpmf.v25i2.3126>
10. Li Y., Zhou W., Ma C., Feng Z., Wang J., Yi S., Wang S. Design and optimization of the seed conveying system for belt-type high-speed corn seed guiding device. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2024. № 17(2). Pp. 123–131. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241702.8427>

11. Ma C., Yi S., Tao G., Li Y., Wang S., Wang G., Gao F. Research on receiving seeds performance of belt-type high-speed corn seed guiding device based on discrete element method. *Agriculture*. 2023. № 13(5). Pp. 1–17. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051085>
12. Wang G., Jin C., Zhang M., Wu C., Tang Q., Yang Y. Reducing Grain Damage in Moist Corn Threshing via Corncob Division. *Agriculture*. 2024. № 14(9). Pp. 1–14. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091648>

Nemchenko M.V. OPERATION OF BELT CONVEYORS DURING GRAIN CROP TRANSPORTATION: IMPACT ON MASS PRESERVATION AND GRAIN QUALITY

The article investigates the preservation of mass and quality characteristics of grain crops during internal transportation at elevator and processing facilities, which is a crucial factor for effective post-harvest logistics. Particular attention is given to belt conveyors, which provide continuous movement of grain at various stages of the technological cycle. Despite their widespread use, the influence of design parameters, operating modes, and operational loads of belt conveyors on mass losses and quality degradation during prolonged or intensive transportation remains insufficiently studied.

This study presents a systematic analysis of the technological characteristics of belt conveyors, including belt types, speed modes, loading and unloading configurations, as well as methods for preventing mechanical damage to grain. Theoretical justification and experimental modeling were carried out to assess the impact of these parameters on shell destruction, changes in moisture content, and the activation of self-heating processes during the transport of grain crops. Particular attention was given to issues such as dust accumulation control, mixing of batches with different quality levels, and the formation of local condensation zones within the transport system.

It was established that the optimization of structural elements of belt conveyors – such as the type and stiffness of the belt, the shape of loading trays, tension parameters, and speed limitations – combined with properly selected operating modes, including inclination angles and duration of continuous operation, allows for minimizing grain mass losses to the level of 1.1–1.4% compared to typical industrial conditions.

Under such optimized conditions, a significant decrease in the proportion of damaged grains was observed, including reduced shell fractures and injuries to the germ and tip, with values falling within the permissible storage norms. The study was based on field tests and laboratory analyses conducted on wheat, maize, and barley batches transported across various production sites using both standard and experimentally adjusted conveyor configurations. The results confirm the feasibility of technically regulating conveyor operation modes in accordance with the physical and mechanical properties of specific crops. The practical significance of the findings lies in their applicability for upgrading existing elevator systems, optimizing intra-facility logistics, and implementing engineering solutions aimed at reducing losses and maintaining the stability of grain quality indicators throughout the entire technological transportation process.

Key words: belt conveyors, grain transportation, mass preservation, grain quality, mechanical damage, transport logistics, operational modes.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 15.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Роганін М.В.

Полтавський державний аграрний університет

Гончаренко О.О.

Полтавський державний аграрний університет

ВИКОРИСТАННЯ 3D-СКАНУВАННЯ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ГЕОМЕТРІЇ ЗНОШЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ТВЕРДОСПЛАВНИХ СТАЛЕЙ

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю підвищення надійності та довговічності машинно-тракторного парку в умовах інтенсивної експлуатації, що супроводжується абразивним зношуванням, динамічними навантаженнями і впливом агресивних середовищ. Навіть незначні відхилення від номінальних геометричних параметрів деталей із твердосплавних сталей спричиняють каскадні дефекти та передчасні відмови, тоді як традиційні методи контролю не забезпечують належної точності та оперативності. Обґрунтовано доцільність використання 3D-сканування як сучасного інструмента діагностики та відновлення, що відповідає тенденціям цифровізації виробництва і переходу до превентивних стратегій технічного обслуговування.

Мета статті полягає в науковому та практичному обґрунтуванні застосування технологій 3D-сканування для діагностики та відновлення геометрії зношених деталей із твердосплавних сталей з урахуванням особливостей сільськогосподарського машинобудування.

Методологія дослідження базується на застосуванні системного підходу і загальнонаукових методів аналізу та синтезу, що забезпечило комплексне вивчення проблеми. Використано методи порівняння, узагальнення та абстрагування для оцінки ефективності традиційних і цифрово інтегрованих технологій відновлення. Здійснено критичний огляд наукових джерел і узагальнено практичний досвід ремонтних підприємств, що дало змогу сформулювати рекомендації щодо впровадження 3D-сканування у виробничі процеси.

Результати дослідження отримано у вигляді доведення ефективності 3D-сканування як інструмента, здатного забезпечити високу точність діагностики та контроль відновлення деталей. Показано, що створення цифрових моделей поверхонь надає можливість формувати карти зношування, відтворювати початкову геометрію та інтегрувати результати в CAD/CAM-системи. Виявлено, що поєднання цифрових технологій із традиційними ремонтними процесами підвищує точність, індивідуалізацію та відтворюваність результатів, скорочуючи водночас матеріальні витрати.

Висновки сформульовано щодо доцільності застосування 3D-сканування як засобу підвищення точності діагностики, оптимізації ремонтно-відновлювальних процесів і зменшення витрат на технічне обслуговування. Виявлено проблеми впровадження, що пов'язані з високою вартістю обладнання, потребою у кваліфікованих кадрах, чутливістю до виробничих умов та складністю інтеграції в наявні технологічні маршрути.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням методів сканування в складних виробничих умовах, розробленням більш доступних портативних систем, оптимізацією алгоритмів обробки великих масивів даних і створенням інтегрованих цифрових платформ моніторингу, зорієнтованих на превентивні стратегії ремонту та підвищення ресурсу машинно-тракторного парку.

Ключові слова: машинно-тракторний парк, технічна діагностика, цифрові технології, ремонтно-відновлювальні процеси, превентивне обслуговування, технічний сервіс, корозія, довговічності деталей, відновлення деталей, 3D-сканування.

Постановка проблеми. Проблема діагностики та відновлення геометрії зношених деталей із твердосплавних сталей набуває актуальності в умовах інтенсивної експлуатації сільськогосподарської техніки. Постійний вплив абразивних частинок ґрунту, динамічні навантаження та агресивні середовища призводять до прискореного зносу робочих органів і вузлів машин, що знижує їхню продуктивність і надійність. Використання традиційних методів контролю зношення не завжди дає змогу своєчасно та точно оцінити втрату геометрії, що ускладнює прийняття рішень щодо доцільності відновлення чи заміни деталей. Технології 3D-сканування відкривають нові можливості для об'єктивного аналізу стану поверхонь і визначення ступеня зношування з високою точністю. Це створює умови для відтворення первинної геометрії деталей, підвищення ефективності ремонтно-відновлювальних процесів і зменшення витрат на технічне обслуговування. Наукове значення проблеми полягає в пошуку шляхів інтеграції сучасних цифрових технологій у практику технічної експлуатації, що сприятиме формуванню нових підходів до продовження строку служби машинно-тракторного парку. Практичний аспект визначається можливістю впровадження 3D-сканування як інструмента для підвищення точності ремонту та підвищення економічної ефективності аграрного виробництва. Таким чином, зазначена проблематика безпосередньо пов'язана з актуальними завданнями машинобудування та механізації сільськогосподарського виробництва, зорієнтованими на підвищення надійності й довговічності техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних досліджень використання 3D-сканування для діагностики та відновлення геометрії зношених деталей із твердосплавних сталей дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані напрями. Перший напрям стосується відтворення реальної геометрії сталевих елементів і використання її для оцінювання залишкової міцності та довговічності. Так, Л. Ф. Сяо (L. F. Xiao), Дж. Х. Пен (J. X. Peng), Дж. Р. Чжан (J. R. Zhang) та співавтори показали, що відтворення фактичної геометрії корозійованих зразків сталі допомагає точніше оцінювати механічні властивості та довговічність у порівнянні з ідеалізованими моделями [1]. Водночас З. Лі (Z. Li), К. Чжан (Q. Zhang), Ф. Ши (F. Shi) та співавтори довели, що 3D-лазерне сканування забезпечує можливість ідентифікації дефектів, які є критичними для стійкості та витривалості сталевих конструкцій [2].

Натомість П. Трибала (P. Trybała), Й. Блаховський (J. Blachowski), Р. Блажей (R. Błażej) та співавтори підтвердили, що аналіз хмар точок дає змогу виявляти локальні пошкодження поверхонь, які безпосередньо впливають на процес зношування [3]. У своєму дослідженні Г. Цортзініс (G. Tzortzinis), К. Ай (C. Ai), С. Ф. Брена (S. F. Breña) та співавтори використали сканування для оцінювання залишкової несучої здатності корозійованих мостових балок, поєднуючи результати експериментів, числових моделей і аналітики [4]. Перспективним є створення уніфікованих підходів, що інтегруватимуть дані сканування в розрахункові моделі витривалості та стійкості твердосплавних сталей.

Другий напрям стосується вивчення впливу параметрів сканування та відновлювальних технологій на мікроструктуру і довговічність матеріалу. Так, Х. Чжао (X. Zhao), С. Дун (S. Dong), С. Янь (S. Yan) та співавтори виявили, що траєкторії сканування під час лазерного наплавлення визначають еволюцію мікроструктури сталі 24CrNiMo та її експлуатаційну стійкість [5]. У своїй праці Д. Сюй (D. Xu), Й. Ван (Y. Wang), С. Лю (X. Liu) та співавтори розробили методику визначення початкових геометричних недосконалостей сталевих елементів за результатами сканування, що має значення для прогнозування стійкості [6]. Науковці Г. Ван (G. Wang), Й. Ма (Y. Ma), Л. Ван (L. Wang), Дж. Чжан (J. Zhang) та інші, показали, що використання даних 3D-сканування дає змогу виконати залишковий втомний аналіз дрітків високої міцності після корозії [7]. Водночас П. Т'ягі (P. Tyagi), Т. Гуле (T. Goulet), К. Різо (C. Riso) та співавтори довели, що хімічне полірування адитивно виготовлених сталевих компонентів зменшує шорсткість і покращує відтворення геометрії [8]. Подальші дослідження мають бути спрямовані на сумісний аналіз мікроструктурних і геометричних змін, зафіксованих у процесах відновлення твердосплавних деталей.

Третій напрям зосереджений на алгоритмічній обробці хмар точок і побудові цифрових двійників для контролю стану конструкцій і супроводу відновлення. Дослідники Л. Ян (L. Yang), Дж. С. Чен (J. C. Cheng), К. Ван (Q. Wang) розробили метод напівавтоматизованого формування BIM-моделей (Building Information Modeling) сталевих конструкцій на основі даних сканування [9]. Натомість А. Халім (A. Haleem), П. Гупта (P. Gupta), С. Бахл (S. Bahl) та співавтори виявили проблеми в процесі оцифрування складних корпусних деталей і запропонували шляхи мінімізації похибок

[10]. Науковці К. Рауш (C. Rausch), Р. Лу (R. Lu), С. Талебі (S. Talebi), К. Хаас (C. Haas) підтвердили, що створення цифрових двійників на основі сканування підвищує ефективність контролю у виробничих процесах [11]. Автори Х. Х. Хосамо (H. H. Hosamo), М. Х. Хосамо (M. H. Hosamo) у своїй роботі акцентували на ролі 3D-лазерного сканування як бази для цифрових двійників у технічному обслуговуванні мостів [12]. Перспективними є дослідження з інтеграції сканування з інтелектуальними системами керування для створення повноцінних цифрових двійників твердосплавних деталей.

Четвертий напрям пов'язаний із підвищенням точності вимірювань та стандартизацією протоколів сканування. Так, С. Вакар (S. Waqar), К. Го (K. Guo), Дж. Сунь (J. Sun) дослідили вплив попереднього підігріву та повторного сканування при селективному лазерному плавленні сталі 316L на залишкові напруження та геометричну стабільність [13]. Дослідники А. М. Маринюк (A. M. Mariniuc), Д. Кожокару (D. Cojocaru), М. М. Абаджіу (M. M. Abagiu) показали можливості машинного навчання в автоматизованій обробці 3D-даних для виявлення поверхневих дефектів [14]. У своєму дослідженні С. Аффатато (S. Affatato), А. Руджієро (A. Ruggiero), С. Логоццо (S. Logozzo) запропонували протокол відтворюваних вимірювань за допомогою 3D-сканерів для оцінки перенесення металевих частинок на біокомпоненти, що є релевантним і для сталевих поверхонь [15]. Важливим доповненням стали результати Т. С. Скобла (T. S. Skoblo), А. І. Сідашенка (A. I. Sidashenko), С. П. Романюка (S. P. Romanuk), А. А. Гончаренка (A. A. Goncharenko) та співавторів, які розкрили специфіку структуроутворення під час модифікації покриттів на виробках із дисперсійно-зміцнених сталей [16]. Подальші дослідження мають бути зорієнтовані на створення уніфікованих стандартів точності та процедур scan-to-repair, які враховуватимуть особливості твердосплавних сталей.

Таким чином, ці дослідження формують комплексне наукове підґрунтя для використання 3D-сканування в діагностиці та відновленні зношених деталей із твердосплавних сталей.

Попри наявні дослідження у сфері технічної діагностики та відновлення деталей машинно-тракторного парку, не вирішеною залишається низка важливих аспектів. Недостатньо вивченим є вплив точності геометричних параметрів на довговічність деталей із твердосплавних сталей у реальних умовах експлуатації. Обмеже-

ним є розуміння можливостей 3D-сканування як комплексного інструмента для діагностики та відновлення, особливо в контексті його інтеграції з традиційними ремонтними технологіями. Виявлено брак системних досліджень, що спрямовані на аналіз проблем впровадження 3D-сканування у виробничих умовах, зокрема щодо високої вартості обладнання, нестачі кадрів та організаційних бар'єрів.

Запропоноване дослідження спрямовано на заповнення цих прогалин шляхом обґрунтування ролі геометричної точності в забезпеченні працездатності деталей, характеристики потенціалу 3D-сканування як діагностичного та відновлювального інструмента, а також аналізу його синергії з традиційними методами ремонту. У запропонованому дослідженні сформульовано рекомендації щодо практичного застосування технології, що дає змогу подолати виявлені обмеження та створити підґрунтя для впровадження превентивних стратегій обслуговування машинно-тракторного парку, розширюючи як наукове, так і практичне розуміння проблеми.

Мета статті полягає в розкритті наукових і практичних засад застосування технологій 3D-сканування для діагностики та відновлення геометрії зношених деталей із твердосплавних сталей з урахуванням особливостей сільськогосподарського машинобудування.

Завдання статті:

1) обґрунтувати значення точності геометрії деталей із твердосплавних сталей для забезпечення їхньої працездатності та довговічності, а також схарактеризувати можливості 3D-сканування як інструмента діагностики та відновлення;

2) проаналізувати ефективність поєднання цифрових технологій контролю з традиційними ремонтно-відновлювальними процесами та виявити головні проблеми й обмеження їх впровадження у виробничих умовах;

3) сформулювати практичні рекомендації щодо інтеграції 3D-сканування в систему технічного обслуговування та ремонту машинно-тракторного парку з урахуванням перспектив цифровізації.

Виклад основного матеріалу. Збереження точності геометричних параметрів деталей із твердосплавних сталей є ключовим чинником забезпечення їхньої працездатності, оскільки навіть незначні відхилення у формах і розмірах призводять до нерівномірного розподілу навантажень, підвищення контактних напружень і при-

скореного розвитку дефектів. У сільськогосподарському машинобудуванні такі деталі працюють у жорстких умовах інтенсивного абразивного зношування та вібраційних навантажень, що робить їх чутливими до втрати первинної геометрії. Відновлення початкових параметрів дає змогу не лише продовжити строк служби, а й забезпечити стабільність технологічних процесів, пов'язаних із роботою машинно-тракторного парку (табл. 1).

Відхилення від номінальних геометричних параметрів у деталях із твердосплавних сталей спричиняють каскадні наслідки, які безпосередньо впливають на працездатність вузлів. Зміна діаметра робочих поверхонь порушує точність посадок, створюючи підвищене тертя та локальні перевантаження. Втрата кутової точності ріжучих кромок призводить до зниження енергоефективності процесу, посилюючи вібраційні навантаження та зношування суміжних елементів. Відхилення від площинності контактних поверхонь зумовлює нерівномірний розподіл сил, що проявляється в розвитку мікротріщин і появі локальних зон руйнування. Недотримання співвісності отворів негативно позначається на роботі підшипникових вузлів і спричиняє прискорене спрацювання валів і втулок [7]. Отже, точність геометрії постає базовою передумовою довговічності та безвідмовності машинно-тракторних агрегатів, а її збереження є одним із ключових завдань сучасного сільськогосподарського машинобудування.

3D-сканування поступово перетворюється на універсальний інструмент технічної діагностики та відновлення зношених деталей із твердосплавних сталей, адже воно дає змогу комплексно відтворити геометрію об'єкта без застосування трудомістких традиційних методів вимірювання. Суть підходу полягає у створенні цифрової копії поверхні з високою роздільною здатністю, що відкриває можливість як для детального аналізу

характеру зношування, так і для формування відновлювальних стратегій. Це забезпечує перехід від суб'єктивних візуальних оцінок до кількісного аналізу, який ґрунтується на об'єктивних даних і допомагає приймати виважені рішення щодо доцільності ремонту чи заміни деталей (табл. 2).

Можливості 3D-сканування виходять далеко за межі традиційного вимірювального контролю. Завдяки створенню високоточних цифрових моделей воно дає змогу отримувати повний спектр інформації про стан деталі: від глобальних відхилень геометрії до мікрodefektів поверхні. В аграрній практиці це означає, що вже після першого циклу експлуатації можна зафіксувати карту зношування, визначити найбільш уразливі зони та оцінити ресурс залишкової працездатності. Сучасні портативні сканери дають змогу проводити діагностику безпосередньо у виробничих майстернях або навіть у польових умовах, що мінімізує прості техніки.

Ще однією вагомою перевагою є інтеграція цифрових моделей у CAD/CAM-системи. Це надає можливість будувати траєкторії для відновлювального наплавлення чи фрезерування з урахуванням фактичного стану деталі, а не за усередненими еталонними параметрами [12]. Таким чином, ремонт стає індивідуалізованим, а його якість – відтворюваною. У випадку ґрунтообробних знарядь, наприклад, плугів або лап культиваторів, це дає змогу не лише відновити початкову геометрію, а й оптимізувати її з урахуванням специфіки ґрунтів, на яких працює господарство.

Накопичення даних сканування створює цифрові бази, які можна використовувати для прогнозування характеру зношування в майбутньому та розроблення профілактичних стратегій технічного обслуговування. Це відповідає світовим трендам розвитку концепції «розумного» сервісу та переходу від реактивного до превентивного ремонту.

Таблиця 1

Вплив точності геометричних параметрів на працездатність деталей із твердосплавних сталей

Геометричний параметр	Відхилення від номіналу	Наслідки для працездатності	Методи контролю та відновлення
Діаметр робочих поверхонь	$\pm 0,2-0,5$ мм	Порушення посадки, підвищене тертя, передчасний знос	3D-сканування, відновлювальне наплавлення, шліфування
Кутові параметри ріжучих кромок	$1-3^\circ$	Зниження ефективності різання, зростання енергоспоживання	Лазерне сканування, корекція профілю, напайка пластин
Площинність контактних поверхонь	$0,05-0,1$ мм	Нерівномірний розподіл навантаження, локальні руйнування	3D-контроль, шліфування, локальне наплавлення
Співвісність отворів	$0,1-0,3$ мм	Порушення центрування, підвищений знос підшипників	Сканування, координатно-відновлювальні операції

Джерело: сформовано на основі [1, с. 129–136; 2; 6, с. 855–874; 7].

Таким чином, 3D-сканування постає не лише діагностичним засобом, а й центральним елементом цифровізації життєвого циклу машинно-тракторних деталей.

Інтеграція цифрових технологій у сферу ремонтно-відновлювальних робіт відкриває нові можливості для підвищення ефективності процесів, що традиційно базувалися на досвіді фахівців і візуальних методах оцінки. Поєднання тривимірного сканування, комп'ютерного моделювання та систем управління відновленням із класичними методами наплавлення, механічної обробки і термічного зміцнення забезпечує новий рівень точності та відтворюваності результатів. Такий підхід дає змогу мінімізувати похибки, скоротити тривалість ремонтного циклу та знизити витрати на технічне обслуговування. Водночас ключовим завданням постає гармонійне поєднання переваг цифрових технологій із перевіреними практиками відновлення, що визначає сучасні тенденції розвитку сільськогосподарського машинобудування (табл. 3).

У сучасних умовах господарства, що застосовують цифрово інтегровані технології, отримують можливість значно підвищити ефективність відновлення техніки. Так, поєднання 3D-сканування з процесами наплавлення допомагає не лише точно відтворювати геометрію деталей, а й оптимізувати витрати на матеріали, що особливо важливо за умов високих цін на твердосплавні порошки та електроди. Інтеграція CAD-моделювання в процеси механічної обробки дає змогу налаштувати індивідуальні режими ремонту для кожної деталі, враховуючи її історію експлуатації та характер дефектів. Використання цифрового контролю якості в поєднанні з термічними методами обробки забезпечує стабільність механічних характеристик і довговічність відновлених елементів. Перспективним є створення баз даних сканувань, які надають можливість прогнозувати майбутні відмови та розробляти графіки превентивного обслуговування. Так, синергія цифрових технологій і традиційних ремонтних процесів

Таблиця 2

Можливості 3D-сканування в діагностиці та відновленні геометрії деталей

Напрямок застосування	Характеристика можливостей	Очікуваний результат	Приклади практичного використання
Геометрична діагностика	Вимірювання відхилень від номіналу з точністю до 0,01 мм	Виявлення прихованих дефектів і нерівномірного зносу	Оцінка стану ріжучих кромок культиваторних лап
Аналіз зони зношування	Формування карт зношування за кольоровими шкалами	Визначення локальних ділянок підвищених навантажень	Моніторинг зношення плугів після польових робіт
Відтворення 3D-моделі	Створення цифрового двійника деталі для подальшої обробки	Підготовка до відновлювального наплавлення або друку	Розробка індивідуальних ремонтних програм
Контроль відновлення	Порівняння відновленої деталі з еталонною моделлю	Забезпечення точності відновлених геометричних параметрів	Контроль якості після шліфування або наплавлення

Джерело: сформовано на основі [3; 4; 9; 11, с. 565–578; 12; 14].

Таблиця 3

Ефективність поєднання цифрових технологій контролю з традиційними методами ремонту

Компонент поєднання	Характеристика взаємодії	Результат для ремонтного процесу	Приклади застосування
3D-сканування + наплавлення	Використання цифрової моделі для формування траєкторій наплавлення	Висока точність відновлення, зменшення перевитрати матеріалів	Відновлення ріжучих кромок сошників і лап
CAD-моделювання + механічна обробка	Підготовка коригованої моделі з урахуванням фактичних відхилень	Індивідуалізація ремонту, підвищення ресурсу відновленої деталі	Шліфування та фрезерування дисків борін
Цифровий контроль якості + термообробка	Порівняння відновленої деталі з еталонною геометрією	Стабільність механічних властивостей, зменшення браку	Азотування та гартування відновлених осей
База даних сканувань + планування технічного обслуговування	Аналіз накопичених даних для прогнозування зношування	Перехід від реактивного до превентивного ремонту	Планування циклів відновлення культиваторних лап

Джерело: сформовано на основі [5; 8, с. 2895–2900; 10, с. 331–337; 13; 15].

формує нову модель технічної експлуатації, орієнтовану на точність, економічність і довгострокову надійність сільськогосподарської техніки.

Впровадження технологій 3D-сканування у виробничих умовах супроводжується низкою проблем та обмежень, що стримують їх широке застосування. Одним із ключових бар'єрів постає висока вартість обладнання та програмного забезпечення, що є особливо відчутним для невеликих ремонтних підприємств і фермерських господарств, де обмежені бюджети не дають змогу інвестувати в складні цифрові системи [10]. Не менш суттєвим обмеженням є потреба у кваліфікованих кадрах: для роботи зі сканерами та CAD/CAM-системами потрібні спеціалісти з відповідними компетентностями, тоді як більшість ремонтних майстерень зорієнтовані на традиційні методи [9; 12]. Додаткову складність становлять умови експлуатації обладнання, оскільки сканери є чутливими до забруднень, вібрацій і нестабільного освітлення, що знижує точність отриманих моделей у реальних цехових або польових умовах [3; 4]. Важливою проблемою залишається також інтеграція результатів сканування у виробничі процеси: для ефективного використання необхідним є узгодження з наявними технологічними маршрутами, що вимагає модернізації обладнання та адаптації програмного забезпечення [5]. Особливої уваги потребує питання збереження та обробки великих масивів даних, адже цифрові моделі деталей займають значні обсяги пам'яті та потребують надійної інфраструктури для зберігання і захисту інформації [14]. Окрім того, для аграрного сектору характерним є нерівномірний доступ до сучасних цифрових технологій у різних регіонах, що поглиблює цифрову нерівність і обмежує швидкість поширення інновацій.

Практичне застосування 3D-сканування в системі технічного обслуговування та ремонту машинно-тракторного парку доцільно будувати на поєднанні його діагностичних можливостей із наявними виробничими процесами. Насамперед сканування варто використовувати для регулярного контролю найбільш навантажених деталей, де точність геометрії критично визначає працездатність вузлів. Це дасть змогу своєчасно виявляти відхилення від номінальних параметрів і планувати ремонтні заходи на етапі, коли ще можна уникнути аварійних відмов. Оптимальним напрямом є інтеграція результатів сканування в CAD/CAM-системи, що забезпечує автоматизовану підготовку відновлювальних програм для наплавлення, фрезерування чи шліфування з урахуванням фактичного

стану деталі. Рекомендовано формувати цифрові бази сканованих моделей, які використовуватимуться не лише для контролю, а й для прогнозування характеру зношування та планування превентивного технічного обслуговування. Доцільним є поступове впровадження портативних сканерів у ремонтних майстернях і сервісних центрах, що дасть змогу проводити діагностику безпосередньо на місці експлуатації техніки. Особливу увагу варто приділити підготовці персоналу: ефективність використання 3D-сканування значною мірою залежить від здатності фахівців інтерпретувати результати та інтегрувати їх у ремонтні процедури. Таким чином, практична реалізація 3D-сканування в системі технічного обслуговування має бути спрямована на підвищення точності діагностики, індивідуалізацію відновлювальних робіт і створення основи для переходу від реактивного ремонту до превентивних стратегій управління життєвим циклом машинно-тракторного парку.

Висновки. У дослідженні встановлено, що збереження точності геометричних параметрів деталей із твердосплавних сталей є фундаментальною умовою їхньої працездатності та довговічності. Відхилення від номінальних значень формують каскадні дефекти, які прискорюють зношування та знижують надійність машинно-тракторних агрегатів. Це зумовлює необхідність застосування високоточних методів контролю, здатних забезпечити об'єктивну оцінку стану деталей у реальних виробничих умовах.

Доведено ефективність 3D-сканування як універсального інструмента діагностики та відновлення. Створення цифрових моделей поверхонь дає змогу комплексно аналізувати характер зношування, формувати карти дефектів, інтегрувати результати в CAD/CAM-системи та готувати індивідуалізовані програми відновлення. Це забезпечує підвищення точності ремонтних операцій, зменшення витрат на матеріали і подовження ресурсу відновлених деталей.

Водночас окреслено коло проблем, що обмежують широке впровадження технології, серед яких: висока вартість обладнання та програмного забезпечення; потреба в спеціалізованій підготовці персоналу; чутливість сканерів до виробничих умов; складність інтеграції в традиційні технологічні процеси; необхідність зберігання значних масивів цифрових даних. Для аграрного сектору додатковим викликом є цифрова нерівність між регіонами, що уповільнює поширення інновацій.

Рекомендовано впроваджувати 3D-сканування поетапно, починаючи з найбільш критичних дета-

лей, створювати цифрові бази для прогнозування зношування та планування превентивного технічного обслуговування, а також інтегрувати результати сканування в CAD/CAM-середовища для автоматизації ремонтно-відновлювальних процесів. Перспективи подальших досліджень пов'язані

з удосконаленням методів сканування у складних виробничих умовах, розробкою доступних портативних пристроїв, оптимізацією алгоритмів обробки великих масивів даних і створенням інтегрованих систем моніторингу стану деталей, зорієнтованих на превентивні стратегії ремонту.

Список літератури:

1. Xiao L. F., Peng J. X., Zhang J. R., Cai C. S. Mechanical properties of corroded high performance steel specimens based on 3D scanning. *Advanced Steel Construction*. 2019. Vol. 15, № 2. P. 129–136. DOI: <https://doi.org/10.18057/IJASC.2019.15.2.2>.
2. Li Z., Zhang Q., Shi F., Wang J., Pasternak H. Geometric properties of steel components with stability and fatigue risks using 3D-laser-scanning. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 1. Article 168. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14010168> (date of access: 08.09.2025).
3. Trybała P., Blachowski J., Błażej R., Zimroz R. Damage detection based on 3D point cloud data processing from laser scanning of conveyor belt surface. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 13, № 1. Article 55. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13010055> (date of access: 08.09.2025).
4. Tzortzinis G., Ai C., Breña S. F., Gerasimidis S. Using 3D laser scanning for estimating the capacity of corroded steel bridge girders: experiments, computations and analytical solutions. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 265. Article 114407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114407> (date of access: 08.09.2025).
5. Zhao X., et al. The effect of different scanning strategies on microstructural evolution to 24CrNiMo alloy steel during direct laser deposition. *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 771. Article 138557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138557> (date of access: 07.09.2025).
6. Xu D., Wang Y., Liu X., Chen B., Bu Y. A novel method and modelling technique for determining the initial geometric imperfection of steel members using 3D scanning. *Structures*. 2023. Vol. 49. P. 855–874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.136> (date of access: 08.09.2025).
7. Wang G., Ma Y., Wang L., Zhang J. Experimental study and residual fatigue life assessment of corroded high-tensile steel wires using 3D scanning technology. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 124. Article 105335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105335> (date of access: 08.09.2025).
8. Tyagi P., Goulet T., Riso C., Garcia-Moreno F. Reducing surface roughness by chemical polishing of additively manufactured 3D printed 316 stainless steel components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 100. P. 2895–2900. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2890-0> (date of access: 08.09.2025).
9. Yang L., Cheng J. C., Wang Q. Semi-automated generation of parametric BIM for steel structures based on terrestrial laser scanning data. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 112. Article 103037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103037> (date of access: 08.09.2025).
10. Haleem A., Gupta P., Bahl S., Javaid M., Kumar L. 3D scanning of a carburetor body using COMET 3D scanner supported by COLIN 3D software: issues and solutions. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 39. P. 331–337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.427> (date of access: 08.09.2025).
11. Rausch C., Lu R., Talebi S., Haas C. Deploying 3D scanning based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing. *International Journal of Construction Management*. 2023. Vol. 23, № 3. P. 565–578. DOI: <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1896942> (date of access: 08.09.2025).
12. Hosamo H. H., Hosamo M. H. Digital twin technology for bridge maintenance using 3D laser scanning: a review. *Advances in Civil Engineering*. 2022. Vol. 2022, № 1. Article 2194949. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/2194949> (date of access: 08.09.2025).
13. Waqar S., Guo K., Sun J. Evolution of residual stress behavior in selective laser melting (SLM) of 316L stainless steel through preheating and in-situ re-scanning techniques. *Optics & Laser Technology*. 2022. Vol. 149. Article 107806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107806> (date of access: 08.09.2025).
14. Mariniuc A. M., Cojocaru D., Abagiu M. M. Building surface defect detection using machine learning and 3D scanning techniques in the construction domain. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 3. Article 669. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14030669> (date of access: 08.09.2025).
15. Affatato S., Ruggiero A., Logozzo S. Metal transfer evaluation on ceramic biocomponents: a protocol based on 3D scanners. *Measurement*. 2021. Vol. 173. Article 108574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108574> (date of access: 08.09.2025).
16. Skoblo T. S., Sidashenko A. I., Romanyuk, S. P. Goncharenko, A. A., Omel'chenko L. V., Bantkovskii V. A. Specific features of structure formation in the course of modification of the coatings on products made of dispersion-hardened steels. *Materials Science*. 2020. Vol. 55, № 6. P. 884–891. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00383-4>

Rohanin M.V., Honcharenko O.O. APPLICATION OF 3D SCANNING FOR DIAGNOSTICS AND RESTORATION OF THE GEOMETRY OF WORN HARD-ALLOY STEEL PARTS

The relevance of this study is determined by the need to improve the reliability and durability of the machine and tractor fleet under conditions of intensive operation, which involve abrasive wear, dynamic loads, and exposure to aggressive environments. Even minor deviations from the nominal geometric parameters of hard alloy steel parts lead to cascading defects and premature failures, while traditional control methods do not provide sufficient accuracy or timeliness. The study substantiates the feasibility of using 3D scanning as a modern tool for diagnostics and restoration, consistent with current trends in production digitalization and the shift toward preventive maintenance strategies.

The purpose of the article is to provide scientific and practical justification for the use of 3D scanning technologies to diagnose and restore the geometry of worn hard alloy steel parts, taking into account the specifics of agricultural machinery manufacturing.

The research methodology is based on a systems approach and general scientific methods of analysis and synthesis, which enabled a comprehensive examination of the problem. Methods of comparison, generalization, and abstraction were applied to evaluate the effectiveness of traditional and digitally integrated restoration technologies. A critical review of scientific sources was conducted, and the practical experience of repair enterprises was summarized, which made it possible to develop recommendations for introducing 3D scanning into production processes.

The results of the study demonstrate the effectiveness of 3D scanning as a tool capable of providing high diagnostic accuracy and control of part restoration. It was shown that creating digital surface models makes it possible to generate wear maps, reconstruct the original geometry, and integrate the results into CAD/CAM systems. It was revealed that combining digital technologies with traditional repair processes enhances accuracy, customization, and reproducibility of outcomes, while at the same time reducing material costs.

The conclusions highlight the feasibility of applying 3D scanning to increase diagnostic accuracy, optimize repair and restoration processes, and reduce maintenance costs. Implementation challenges were identified, including high equipment costs, the need for qualified personnel, sensitivity to production conditions, and difficulties in integrating into existing technological routes.

Future research prospects are related to improving scanning methods under complex production conditions, developing more affordable portable systems, optimizing algorithms for processing large data sets, and creating integrated digital monitoring platforms focused on preventive repair strategies and extending the service life of the machine and tractor fleet.

Key words: machine and tractor fleet, technical diagnostics, digital technologies, repair and restoration processes, preventive maintenance, technical service, corrosion, durability of parts, restoration of parts, 3D scanning.

Дата надходження статті: 05.09.2025

Дата прийняття статті: 23.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 37.013:656.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/04>**Стратонов В.М.**

Українська державна льотна академія

Мусієнко А.Д.

Українська державна льотна академія

ПРОБЛЕМА СУЇЦИДАЛЬНОГО ТЕРОРИЗМУ НА АВІАЦІЙНОМУ ТРАНСПОРТІ: ПЕРСПЕКТИВИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ АКТИВ НЕЗАКОННОГО ВТРУЧАННЯ

У статті досліджуються актуальні проблеми авіаційної безпеки (АБ), пов'язані з актами незаконного втручання (АНВ) у діяльність цивільної авіації (ЦА), що здійснюються терористами-смертниками. Розглянуто випадки АНВ, що були здійснені у різний період: теракти 11 вересня 2001 року у США, вибух в аеропорту міста Кабул 2021 року та скоординований напад на аеропорт Атаатюрк у Стамбулі 2016 року. Проаналізовано динаміку поширення АНВ за останні десятиліття та виявлено зростання їх інтенсивності у регіонах Близького Сходу та Північної Африки, де політична нестабільність і збройні конфлікти створюють сприятливі умови для реалізації атак. Статистичні дані Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO) свідчать, що у тільки у 2022 році було зафіксовано більше 60-ти випадків АНВ, що є найвищим показником за останні три десятиліття років. Додатково визначені інші сучасні тенденції розвитку загроз для ЦА, серед яких нами виокремлено можливість застосування БпЛА проти об'єктів ЦА, кібератаки на інформаційні та навігаційні системи, а також масові фейкові повідомлення про саморобні вибухові пристрої, що завдають значних економічних збитків та паралізують роботу аеропортів і авіакомпаній. Визначено, що одним із найнебезпечніших АНВ залишаються атаки із застосуванням терористів-смертників, які цілеспрямовано обирають стратегічні зони аеропортів із великою скупченістю людей, завдаючи масштабних людських і матеріальних втрат. У статті наголошується, що попри розвиток систем попередження АНВ в аеропортах, досі відсутні дієві алгоритми своєчасного виявлення та нейтралізації таких загроз. Особливу увагу приділено питанню міжнародної співпраці та координації між авіакомпаніями, службами авіаційної безпеки (САБ), правоохоронними органами, адже саме обмін оперативною інформацією та уніфікація стандартів дозволяють ефективніше протидіяти сучасним викликам. Автори статті приходять до висновку, що на сьогодні алгоритм дій співробітників САБ у разі загрози застосування на об'єктах ЦА терористів-смертників відсутній у цілісному вигляді, й потребує комплексного підходу щодо його розробки.

Ключові слова: цивільна авіація, авіаційна безпека, акти незаконного втручання (АНВ), терористи-смертники.

Постановка проблеми. У ХХІ столітті тероризм перетворився на одну з головних загроз глобальній безпеці. Аеропорти та інші авіаційні об'єкти залишаються привабливими цілями для терористичних актів через велику концентрацію людей, значимість інфраструктури й можливість створити широкий суспільний резонанс. Суїцидальні терористи становлять надзвичайно високий ризик через готовність завдати макси-

мальних людських втрат, а також через складність попереднього виявлення такої особи в громадських місцях серед безлічі інших пасажирів. Проблема виявлення терористів-смертників на об'єктах авіаційного транспорту ускладнює те, що на сьогодні фактори, які відображають аномальну поведінку потенційних терористів-смертників хоч і є визначеними, проте вони досі не є пріоритезованими.

© Стратонов В.М., Мусієнко А.Д., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Актуальність теми також підкреслюється новими викликами, що пов'язані з розвитком технологій. Терористи вдосконалюють способи приховування вибухівки, зокрема використовуючи так звані «body bombs» – імплантацію вибухових пристроїв у тіло людини. Подібні випадки вже обговорювались у Франції та Німеччині як серйозна загроза, що виходить за межі можливостей стандартних технічних засобів контролю на безпеку, і ставить перед САБ завдання розробки більш ефективних методів виявлення та нейтралізації таких загроз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові роботи Пейпа, Блум, Гофмана та Могадама демонструють, що суїцидальні теракти найчастіше застосовуються у випадках, коли інші методи боротьби проти сильнішого супротивника виявляються неефективними [1]. При цьому дослідники наголошують, що вказані теракти виконують й функцію символічного впливу, створюючи образ «священної жертви» та підсилюючи пропагандистський ефект [2].

Разом із тим, сучасні публікації у сфері безпеки авіаційного транспорту вказують на практичні труднощі своєчасного виявлення таких загроз. Зокрема, підкреслюється обмежена наукова надійність поведінкових індикаторів «аномальної поведінки», які часто дають помилкові спрацьовування [3]. Тому акцент наукових досліджень переноситься на створення комплексних алгоритмів реагування, що поєднують моніторинг, швидке оповіщення, скоординовані дії персоналу та мінімізацію ризиків для пасажирів та співробітників САБ [4].

Таким чином, останні дослідження вказують на потребу інтеграції загальнотеоретичних висновків про логіку суїцидального тероризму з прикладними напрацюваннями у сфері АБ. Це створює підґрунтя для розробки алгоритму дій

співробітників САБ у випадку виявлення потенційного суїцидального терориста.

У зв'язку із зростанням терористичних загроз у ЦА та високою небезпекою суїцидальних атак, завданнями даного дослідження є аналіз АНВ, що пов'язані з атаками терористів-смертників на об'єкти авіаційного транспорту й визначення підходів щодо розробки алгоритму дій співробітників САБ, який забезпечував би своєчасну ідентифікацію потенційних терористів-смертників, й зміг би мінімізувати ризики для пасажирів й персоналу.

Виклад основного матеріалу. ЦА є особливо вразливою до АНВ з причин одночасної концентрації пасажирів як на повітряних суднах (ПС), так і у аеровокзалах, високу швидкість і складність управління польотами [5]. Події 11 вересня 2001 року стали переломним моментом: терористи захопили ПС та використали їх як зброю, що змусило міжнародну спільноту переглянути стандарти безпеки. ІКАО оновила Додаток 17 «Безпека» до Чиказької конвенції, впровадивши жорсткіші вимоги до перевірки пасажирів і багажу, охорони аеропортів і контролю доступу до зон обмеженого використання [5].

За останні два десятиліття ЦА стала об'єктом атак для різних форм АНВ. Наймасштабнішими були теракти 11 вересня 2001 року. Політичні мотиви також спричиняли інциденти: у 2021 році ПС Ryanair FR4978 змусили приземлитися в Мінську через повідомлення про «бомбу» задля арешту одного з помітних представників білоруської опозиції. Військова напруга між державами також генерує загрози для ЦА, чому підтвердженням є збиття у 2020 році рейсу МАУ PS752 в Ірані засобами протиповітряної оборони. Усі 176 осіб, що перебували на борту загинули [6].

З метою наочного відображення масштабів АНВ у діяльність ЦА наведено дані за останні роки (рис. 1).

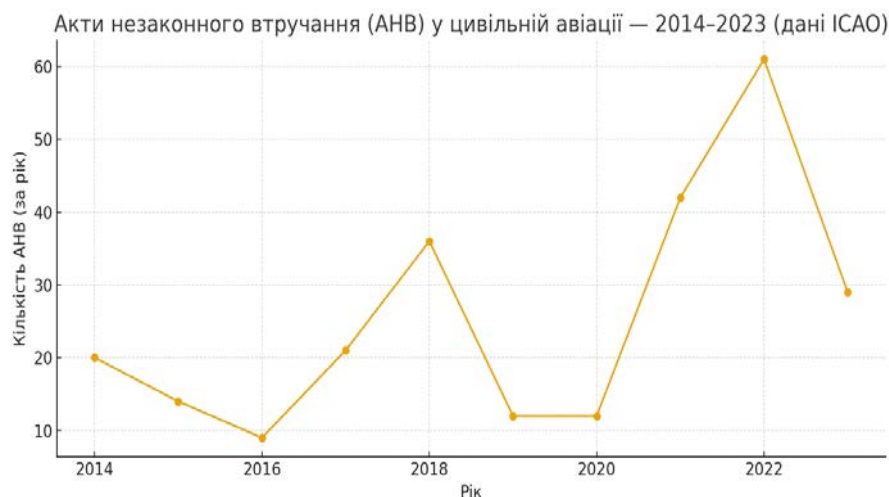


Рис. 1. Розподіл АНВ за роками

Також, характерним є те, що більшість інцидентів припадає на країни Близького Сходу та Північної Африки, де є високий рівень політичної нестабільності, наявні збройні конфлікти, а терористична активність сприяє реалізації подібних атак.

Застосування терористів-смертників терористичними організаціями часто поєднуються з іншими сучасними АНВ, й включають використання новітніх технологій (дрони та кібератаки), так у 2018 році аеропорт Гатвік у Великій Британії був паралізований на добу через появу безпілотників поблизу злітно-посадкових смуг [7]. Кібератаки впливають на критично важливі елементи інфраструктури: системи управління повітряним рухом, комунікаційні канали між екіпажем і диспетчерами, навігаційні дані та бази авіакомпаній [8]. Фейкові повідомлення про вибухівку щороку спричиняють масові евакуації, затримки рейсів і значні економічні збитки [8].

В Індії хвиля фейкових мінувань у жовтні 2024 року призвела до серйозних порушень у авіаційній сфері. Протягом одного тижня зафіксовано понад 90 інцидентів, які торкнулися внутрішніх і міжнародних рейсів. Постраждали авіакомпанії Air India, IndiGo, Vistara, Akasa Air та міжнародні перевізники, такі як American Airlines, JetBlue і Air New Zealand. Це спричинило затримки, корегування маршрутів та супроводження цивільних ПС винищувачами. Хвиля загроз призвела до значних фінансових втрат для авіакомпаній та аеропортів, включаючи додаткові витрати на компенсацію пасажирів та перенаправлення ПС [9].

Окрему увагу приділено кіберзахисту, зокрема безпеці систем управління повітряним рухом, навігаційних даних і комунікаційних каналів між екіпажем і диспетчерами, а також використанню аналітичних інструментів для раннього виявлення потенційних ризиків [10]. Крім того, міжнародні стандарти ICAO та Міжнародної асоціації повітряного транспорту (IATA) відіграють ключову роль у формуванні уніфікованих процедур безпеки, що дозволяє підвищувати ефективність заходів на глобальному рівні та координувати дії авіакомпаній, аеропортів і САБ [5].

Міжнародний досвід забезпечення АБ демонструє широкий спектр заходів, що застосовуються в різних країнах для мінімізації ризиків АНВ. У Сполучених Штатах після терактів 11 вересня 2001 року було створено TSA (Transportation Security Administration), яка впровадила багаторівневу систему перевірки пасажирів і багажу, зокрема сканери нового покоління, вибіркової перевірки та поведінковий аналіз пасажирів [5].

У країнах Європейського Союзу реалізується Європейська система АБ, що передбачає процедури контролю доступу до обмежених зон, перевірку багажу, а також навчання персоналу щодо виявлення підозрілої поведінки [5].

Ізраїль застосовує комплексний підхід, орієнтований на профілактичний аналіз ризиків, що включає профайлінг пасажирів, поведінковий аналіз, що дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечних осіб ще до посадки на борт [1].

Таким чином, досвід США, ЄС, Ізраїлю свідчить про ефективність поєднання технічних, поведінкових і організаційних заходів безпеки, що може стати основою для розробки комплексного алгоритму дій САБ при реагуванні на появу поблизу аеропортів терористів-смертників.

Аналізуючи випадки застосування терористів-смертників на об'єктах ЦА, нами було відзначено, що характерною рисою більшості подібних АНВ є вибір стратегічно важливих локацій у межах аеропортів, де зосереджена найбільша кількість пасажирів. Яскравим прикладом є напад на міжнародний аеропорт у Кабулі 26 серпня 2021 року. Під час масової евакуації цивільних осіб та військових після захоплення влади Талібаном смертник, пов'язаний з терористичною організацією «Ісламська держава – Хорасан» (ISIS-K), здійснив вибух біля входу в аеропорт (Abbey Gate), де тисячі людей очікували на проходження контролю для потрапляння на ПС. Вибух спричинив масові жертви серед цивільних та військових: загинуло 13 американських військових і понад 160 афганських цивільних, а ще десятки людей отримали поранення. Попри присутність охорони, нейтралізувати нападника не вдалося через обмеження правил відкриття вогню та хаотичну ситуацію на місці події [11].

Ще одним характерним випадком є атака на аеропорт ім. Ататюрка в Стамбулі (28 червня 2016 року), під час якого троє озброєних чоловіків під'їхали на таксі, відкрили вогонь біля входу в міжнародний термінал, а потім активували вибухові пристрої. Атака, що тривала лічені хвилини, спричинила паніку, масовий хаос серед людей і завдала великої кількості жертв (за різними даними загинуло від 36 до 48 осіб, поранено ж було понад 200). Двоє з нападників підірвали себе всередині терміналу, третій підірвався на стоянці. У ході розслідування турецькою владою й міжнародними службами було встановлено причетність до теракту представників «Ісламської держави» [12].

Ці атаки підкреслили вразливість ЦА та об'єктів інфраструктури (особливо у зонах кон-

флікту та поблизу цих зон), де терористи спроможні здійснювати напади як інфільтруючись до контрольованої зони аеропорту, так і приводячи у дію вибухові пристрої поблизу (у неконтрольованій зоні аеропорту). Проведений аналіз вказує на відсутність дієвих алгоритмів для своєчасного виявлення потенційних нападників, попри існуючі методи безпеки.

Підсумовуючи проведений аналіз, нами було здійснено висновок, що перспективним напрямком попередження такого виду АНВ, як застосування терористів-смертників є розробка ефективного алгоритму дій співробітників САБ для своєчасного виявлення і нейтралізації вказаної загрози. Задля розробки алгоритму дій нами буде проведено комплексну роботу, що полягатиме у здійсненні експертного опитування серед авіафахівців щодо ряду аспектів, як тих, що стосуються виявлення терористів-смертників, так і факторів, які стосуються заходів безпеки відносно співробітників САБ у разі безпосереднього контакту з потенційними терористами.

Зокрема, експертам під час опитування пропонуватиметься розташувати за пріоритетністю технічні засоби, які на їхню думку найбільше сприятимуть виявленню терористів-смертників на безпечних відстанях від місць скупчень людей (радарні системи, аналізатори ходи, системи відеоспостереження з можливістю миттєвої обробки відеопотоку тощо). Надалі експертам пропонуватиметься визначити та ранжувати прояви аномальної чи підозрілої поведінки, яка може вказати на особу, як на терориста-смертника (уникання камер, неспокійна поведінка, носіння об'ємного одягу, раптові зміни напрямку руху тощо).

Наостанок експертам необхідно буде оцінити дії співробітників САБ (чи спеціальні засоби, які здатні це забезпечити), що здатні з достатнім ступенем ефективності забезпечити збереження здоров'я та життя під час контакту з терористом-смертником. До оцінювання пропонуватиметься ряд факторів, як то:

– застосування на робочому місці засобів індивідуального захисту;

– носіння й застосування вогнепальної зброї;

– носіння й застосування зброї нелетальної дії (травматична зброя, електрошокова, що знерухомлює і т.п.);

– застосування у інтер'єрі пунктів догляду предметів та конструкцій, які захищають від вибухової хвилі (посиленні перегородки, стіни, столи і т.п.);

– облаштування й використання окремої вибухозахисної кімнати (або ж посилення конструкцій кімнати для особистого догляду) тощо.

Засновуючись на отриманих оцінках нами буде запропоновано оптимальну стратегію дій (алгоритм дій), яка враховуватиме оптимальне поєднання сучасних технічних засобів, що будуть спрямовані на виявлення аномальної чи підозрілої поведінки (етап перебування потенційного терориста поза пункту догляду чи місць скупчення людей), так і способи (засоби) забезпечення збереження здоров'я та життя співробітників САБ.

Висновки. У результаті аналізу літературних джерел та реальних випадків за участю терористів-смертників, нами було зроблено висновок, що станом на сьогодні не існує єдиного, дієвого та уніфікованого алгоритму для своєчасного виявлення, знешкодження та нейтралізації загроз суїцидального тероризму на етапі перебування потенційного терориста поблизу (або на території) авіасуб'єкту. Складність раннього виявлення смертників зумовлена як поведінковими та психологічними особливостями виконавців, так і складністю вибору оптимальних технічних засобів виявлення. Отже, існує нагальна потреба у розробці комплексного алгоритму дій САБ, який поєднував би застосування технічних засобів детекції, швидкий обмін оперативною інформацією між співробітниками САБ та представниками правоохоронних органів. Розробка і апробація такого алгоритму є ключовим напрямом подальших досліджень.

Список літератури:

1. Pape R. A. *Dying to Win: The Strategic Logic of Suicide Terrorism*. New York : Random House, 2005. 352 p.
2. Bloom M. *Dying to Kill: The Allure of Suicide Terror*. New York : Columbia University Press, 2005. 288 p.
3. Hoffman B. *Inside Terrorism*. Rev. and expanded ed. New York : Columbia University Press, 2006. 432 p.
4. Moghadam A. *The Globalization of Martyrdom: Al Qaeda, Salafi Jihad, and the Diffusion of Suicide Attacks*. Baltimore : Johns Hopkins University Press, 2008. 336 p.
5. International Civil Aviation Organization. *Annex 17 to the Convention on International Civil Aviation: Security. Safeguarding International Civil Aviation Against Acts of Unlawful Interference*. 11th ed. Montreal: ICAO, 2020. 118 p.
6. Мартін Р. Ukraine International Airlines flight 752 (PS752). Encyclopaedia Britannica. 13 серп. 2025. URL: <https://www.britannica.com/event/Ukraine-International-Airlines-flight-752>

7. Shackle S. The mystery of the Gatwick drone. The Guardian. 1 груд. 2020. URL: <https://www.theguardian.com/uk-news/2020/dec/01/the-mystery-of-the-gatwick-drone>
8. Ukwandu E., Ben Farah M. A., Hindy H., Bures M., Atkinson R., Tachtatzis C., Bellekens X. Cyber-Security Challenges in Aviation Industry: A Review of Current and Future Trends [Електронний ресурс] / E. Ukwandu, M. A. Ben Farah, H. Hindy, M. Bures, R. Atkinson, C. Tachtatzis, X. Bellekens. *arXiv*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.04910>
9. The Guardian. India's airline industry in chaos after 90 hoax bomb threats in a week. URL: <https://www.theguardian.com/world/2024/oct/21/india-airline-industry-in-chaos-after-90-hoax-bomb-threats-in-a-week>
10. Брус Т. М. Система забезпечення авіаційної безпеки України в контексті міжнародної практики. *Dictum Factum*. 2023. № 1. URL: <https://df.duit.in.ua/index.php/dictum/article/view/24/18>
11. Baldor L. C., Amiri F. Review says Abbey Gate bombing wasn't preventable, refutes claims troops sighted the would-be bomber. *The Associated Press*, 2024, April 15. URL: <https://apnews.com/article/afghanistan-withdrawal-abbey-gate-28dcaccf6f946bc171a2133ddb123de>
12. Kiper C. Istanbul airport attack victims mourned, honored, praised. *The Associated Press*, 2016, June 30. URL: <https://apnews.com/4302f2e97a914f6d9d3bf4d7c97cb3a9>

Stratonov V.M., Musiienko A.D. THE PROBLEM OF SUICIDAL TERRORISM IN AIR TRANSPORT: PROSPECTS FOR PREVENTING ACTS OF UNLAWFUL INTERFERENCE

The article examines current challenges to aviation security (AS) related to acts of unlawful interference (AUI) in civil aviation (CA) committed by suicide terrorists. Cases of AUI committed in different periods are considered, including the terrorist attacks of September 11, 2001 in the United States, the explosion at Kabul Airport in 2021, and the coordinated assault on Atatürk Airport in Istanbul in 2016. The dynamics of AUI over the past decades are analyzed, revealing an increase in their intensity in the Middle East and North Africa, where political instability and armed conflicts create favorable conditions for such attacks. According to statistical data from the International Civil Aviation Organization (ICAO), more than 60 cases of AUI were recorded in 2022, representing the highest figure in the past three decades. Additional modern trends in threats to CA are identified, including the potential use of unmanned aerial vehicles (UAVs) against CA facilities, cyberattacks targeting information and navigation systems, as well as mass hoaxes involving improvised explosive devices, which cause significant economic losses and disrupt the operation of airports and airlines. It is determined that one of the most dangerous AUIs remains suicide terrorist attacks, which deliberately target strategic airport zones with high concentrations of people, causing large-scale human and material losses. The article emphasizes that despite the development of prevention systems against AUI at airports, there are still no effective algorithms for the timely detection and neutralization of such threats. Particular attention is paid to the importance of international cooperation and coordination among airlines, aviation security services (ASS), and law enforcement agencies, since the exchange of operational information and the unification of standards make it possible to counter modern challenges more effectively. The authors conclude that at present, a comprehensive algorithm of actions for ASS personnel in case of suicide terrorist threats to CA facilities does not exist in an integral form and requires a systematic approach to its development.

Key words: civil aviation, aviation security, acts of unlawful interference (AUI), suicide terrorists.

Дата надходження статті: 29.09.2025

Дата прийняття статті: 15.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 504.06

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/05>

Валюженич О.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Ключник І.І.

Харківський національний університет радіоелектроніки

СУЧАСНІ ПРИЛАДИ КОЛЬОРОМЕТРІЇ У МОНІТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА. МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРОБЛЕМИ ТОЧНОСТІ

Стаття присвячена екологічному стану навколишнього середовища, який одним із ключових аспектів стало розвинутого суспільства. Окрім цього, якісний моніторинг стану довкілля безпосередньо впливає на вчасність та доцільність природоохоронних заходів та раціональне використання природних ресурсів.

У статті розглянуто кольориметричні методи оцінки якості навколишнього середовища. Вони посідають важливе місце, серед методів аналітичного контролю. Простота, всюдоступність, відносна дешевизна та висока швидкість виконання аналізів призвели до численного поширення застосування кольориметричного методу при оцінці стану навколишнього середовища. Крім цього, такі характеристики методу дозволяють застосовувати його навіть в польових умовах, що значно спрощує процес оцінки стану навколишнього середовища. Цей аспект особливо важливий для громадських організацій та освітніх проєктів, що прагнуть долучитися до моніторингу екологічного стану навколишнього середовища.

Досліджено, що з плином часу активно розширюється спектр сучасних засобів кольориметрії, від тест-смужок до портативних фотометрів та спектроколориметрів, і, навіть мобільних додатків для визначення концентрації забруднювача. Така різноманітність методів та приладів відкриває широкі можливості для швидкої та якісної оцінки екологічного стану навколишнього середовища навіть у польових умовах. Разом з тим, таке поширення та доступність сучасних приладів та засобів, може супроводжуватися низкою метрологічних проблем, що впливають на результати досліджень, їх інтерпретацію та відтворюваність. В результаті дослідження виявлено такі можливі проблеми як:

- розбіжності в результатах вимірювання між бюджетними та дорого вартісними приладами вимірювання;*
- вплив зовнішніх факторів на інтерпретацію результатів вимірювання (освітленість, температура, суб'єктивність зорового сприйняття);*
- відсутність єдиних підходів до оцінки похибок та невизначеності результатів вимірювань.*

Ключові слова: екологічний моніторинг, кольориметрія, навколишнє середовище, вимірювання, дослідження, забруднення, похибка, прилади.

Постановка проблеми. Сучасний стан метрології як науки призвів до активного розвитку її засобів та методів. Безпосередньо, це стосується і питання екологічного моніторингу якості навколишнього середовища. Питання розвитку кольориметричного методу та приладів, що використовують цей метод, сьогодні набуло активного розвитку. Незважаючи на такий прогресивний

розвиток сучасних кольориметричних приладів, питання забезпечення їх метрологічної надійності досі залишається неосвітленим. Проблему створюють низка питань, зокрема, відсутність єдиного методу калібрування, що був би універсальним для всіх приладів, та міг би забезпечити точність результатів вимірювань незалежно від типу та призначення приладу. Крім цього, на

© Валюженич О.О., Ключник І.І., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

точність та відтворюваність результатів досліджень істотно впливають зовнішні чинники, такі як спектральний склад освітленості, температура навколишнього середовища, суб'єктивність зорового сприйняття. Довготривала стабільність та якість відтворювання результатів вимірювань також є суттєвою проблемою у багатьох сучасних цифрових приладах.

Таким чином, актуальною проблемою на сьогодні залишається розгляд основних приладів які базуються на застосуванні кольориметричного методу та які використовуються при оцінці екологічного стану навколишнього середовища. Також, актуальною проблемою є дослідження питання проблем точності результатів вимірювань, отриманих за допомогою приладів, що базуються на використанні кольориметричного методу оцінки екологічного стану навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний стан екологічного середовища характеризується постійним антропогенним навантаженням. Така сучасна ситуація потребує швидких, надійних та доступних методів, що дозволять проводити якісну оцінку екологічного стану навколишнього середовища. Традиційні фізико-хімічні методи дослідження, попри гарну якість результатів, потребують певного дороговартісного обладнання, персоналу та часових витрат. Відповідно, це обмежує використання фізико-хімічних методів в обмежених, польових умовах. Це є причиною активного розвитку альтернативних аналітичних технологій в останні роки. Кольориметрія посідає важливе місце серед альтернативних технологій дослідження екологічного стану навколишнього середовища. Відносна дешевизна, швидкість та гнучкість проведення досліджень, надає кольориметричному методу значні переваги.

Останні досягнення у галузі оптичного розпізнавання та цифрових технологій для смартфонів, дали новий поштовх розвитку та широті застосування кольориметричного методу при оцінці екологічного стану навколишнього середовища. Цьому питанню приділяється значна увага, оскільки через можливість застосування смартфонів, використання кольориметричного методу стане ще більш доступним та поширеним. Це стало можливим завдяки поєднанню стрімкому розвитку технологій, високій роздільній здатності камер, інтегрований оптичних сенсорів та зростаючим обчислювальним можливостям смартфонів. [2, 3]. Крім того, важливим напрямом сучасних досліджень є огляд та систематизація вже існуючих здобутків у галузі кольориметрії. Вчені опи-

сують останні досягнення, прогрес та інновації зроблені протягом 10 років, та відзначають розширення матеріальної бази. У роботі також зосереджено увагу на саме портативних приладах для екологічного моніторингу стану навколишнього середовища, та підкреслюється, що поява таких пристроїв розширює можливості для проведення польових досліджень [6].

Метою статті є аналіз сучасних приладів кольориметрії, що застосовуються у моніторингу екологічного стану навколишнього середовища, з метою оцінки їх метрологічних характеристик, виявлення основних проблем точності та відтворюваності результатів, а також визначення можливих напрямів удосконалення метрологічного забезпечення таких методів.

Виклад основного матеріалу. Ефективне застосування кольориметричного методу, при оцінці екологічного стану навколишнього середовища, неможливе без розуміння основ кольориметричного методу та його приладів, та їх метрологічних характеристик [1]. Необхідно провести метрологічний аналіз приладів, що застосовуються при використанні кольориметричного методу, це дасть можливість оцінити не тільки загальні можливості приладу, а й визначити такі характеристики як чутливість, відтворюваність показників, стабільність показників при різних умовах. Сучасний стан розвитку кольориметрії характеризується широким спектром засобів, від найпростіших та розповсюджених тест-смужок, до смартфонів та мобільних додатків з вбудованими оптичними сенсорами, що неодмінно рухає науку вперед та відкриває нові можливості у питанні оцінки екологічного стану навколишнього середовища [5, 2]. Кожен метод має як свої безсумнівні переваги, так і недоліки, що проявляються у якості похибок вимірювань та складнощів при інтерпретації результатів.

Тому, спершу виникає необхідність в проведенні метрологічного аналізу приладів кольориметрії. Такий підхід дозволить систематизувати вже наявні досягнення та знання в питанні приладів, виявити їх сильні та слабкі сторони а також виявити можливі чинники та обставини, що безпосередньо впливають на точність результатів та наявність похибок. Після цього можна буде перейти до аналізу проблеми неточності вимірювань що виникають у різних умовах.

Таким чином, логіка дослідження побудована на тому, аби спершу заглибитись в фундаментальну основу, провести метрологічний аналіз характеристик та принципів роботи сучасних

методів та приладів кольориметрії. Провівши аналіз таких фундаментальних тем, можна буде здійснити критичний розбір проблеми, що пов'язана з неточністю результатів вимірювань та відтворюваності результатів досліджень при оцінці екологічного стану навколишнього середовища.

Методи кольориметрії. Найбільш поширеним методом кольориметрії є візуальна кольориметрія. Цей метод є одним із найстаріших та найбільш базових методів кольориметрії, оскільки базується на візуальному спостереженні. Суть методу полягає у візуальному спостереженні над зміною кольору реагенту чи індикаторної проби, та порівнянні результату візуального спостереження зміну кольору з еталонною шкалою кольору. Залежно від концентрації речовини, зміни рН або температури змінюються колірні параметри такі як колір, його інтенсивність, чи насиченість. Еталонна шкала кольорів зображена на рис. 1.

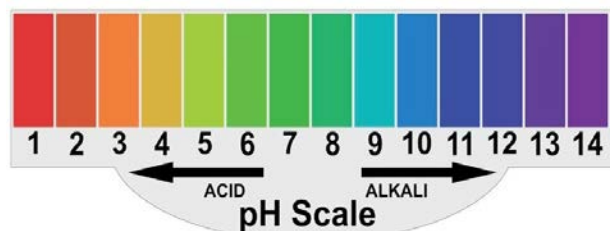


Рис. 1. Еталонна шкала визначення pH розчинів

Візуальний метод в кольориметрії часто застосовується як попереднє, швидке оцінювання за відсутності можливості проведення лабораторних досліджень або в польових умовах, коли потрібно швидко оцінити обстановку та отримати результат без складного обладнання та людського ресурсу. Спочатку досліджувану речовину наносять на спеціальні тест-смужки [5] де зразок досліджуваної речовини контактує з реагентом, що призводить до зміни забарвлення тест-смужки, яке візуально аналізується експертом. Отримані результати порівнюються з еталонною шкалою кольорів та інтерпретуються експертом, який визначає приблизну концентрацію тих чи інших речовин в досліджуваному зразку. Такий метод визначення наявності чи концентрації патогенних речовин в, наприклад, водоймах, при екологічній оцінці якості стану навколишнього середовища, є дуже простим та поширеним, але відносно дієвим. Незважаючи на просту реалізацію та все доступність у складних умовах, метод має низку недоліків. Це і вплив зовнішніх чинників, таких як рівень та температура освітлення під час інтерпретації результатів, так і неможливість визначити низькі концентрації

тієї чи іншої речовини, при використанні візуального методу кольориметрії [7].

Фотометрична кольориметрія. Одним із ключових напрямів розвитку оцінки екологічного стану навколишнього середовища є застосування методу фотометричної кольориметрії. Суть методу полягає у вимірюванні інтенсивності світла яке проходить через досліджуваний зразок після його реакції з барвником. Інтерпретації даних та отримання результатів вимірювання концентрації речовини прямо пов'язані із законом Бугера-Ламберта-Бера, який описує експоненційне зменшення інтенсивності світла, залежно від густини середовища.

На відміну від класичного, візуального методу кольориметрії, де результат часто спотворюється суб'єктивністю зорового сприйняття, фотометричний метод забезпечує більшу точність та надійність. З допомогою фотометричного методу кольориметрії можна отримати більш точну, стандартизовану, та відтворювану оцінку результатів. Саме завдяки таким характеристикам, а також можливості працювати зі зразками з низькою концентрацією патогенної речовини, фотометричний метод набув широкого поширення при екологічному моніторингу стану навколишнього середовища. Цей метод дозволяє оперативно виявити вміст таких сполук як нітратів, фосфатів, важких металів у воді, ґрунті, атмосфері [8, 9].

Натомість, використання методу фотометричної кольориметрії потребує значно більших фінансів аніж візуальний метод. Крім того, аби отримати якісні результати дослідження, необхідно провести певну підготовку зразків в контрольованих умовах, адже прилади досить чутливі до домішок у зразках, що не завжди видається можливим.

Прилади кольориметрії. Одним із базових та найпоширеніших втілень фотометричного методу у кольориметрії стали фотоколориметри (рис. 2). Фотоколориметр для кількісного аналізу вмісту тієї чи іншої речовини у зразку, за зміною інтенсивності забарвлення розчину. На відміну від ще одного приладу, спектрофотометра, що також активно застосовується у кольориметричному методі екологічного моніторингу стану навколишнього середовища, фотоколориметри працюють із обмеженим набором світлофільтрів. З однієї сторони, це робить прилад значно простішим та дешевшим [10], а з іншої, обмежує його спектр використання та його функціональність. Похибка точності фотоколориметрів різних моделей коливається в межах 2-5%, залежно від моделі та умов вимірювання, чутливість достатня для виявлення

речовин у межах мілі- та мікромолярних рівнів. У сучасній науці фотоколориметри використовують не тільки при екологічному моніторингу довкілля, а й у інших галузях, наприклад, у медицині, та харчовій промисловості.



Рис. 2. Фотоколориметр

Одними з найважливіших оптичних приладів сучасної кольориметрії є спектрофотометри Рис 3. Такі прилади використовують для кількісного та якісного вимірювання тієї чи іншої речовини в розчинах, шляхом вимірювання пропускання або поглинання світлових променів в широкому діапазоні хвиль, від ультрафіолету до інфрачервоного світла. Робота з таким широким діапазоном довжин світлових хвиль зумовлюється використанням призми чи дифракційних решіток, які дозволяють точно виділяти будь-яку довжину хвилі. Завдяки цьому використання спектрофотометрів дозволяє отримати ще більш точні результати досліджень порівняно з використанням фотоколориметрів. Залежно від моделі діапазон довжини світлових хвиль складає 190-1100 нм, спектральна роздільна здатність зазвичай складає 1-2 нм, межа виявлення концентрації відповідає мікро- та наномолярним рівням для багатьох органічних та неорганічних сполук, що в разі точніше ніж у фотоколориметрів.



Рис. 3. Спектрофотометр

Такий широкий спектр довжини світлових хвиль, з якими може працювати спектрофотометр, робить метод універсальним, чутливим та точним [10]. Також використання спектрофотометрів дає можливість проводити багатокомпонентний аналіз що можливий як в лабораторних, так і в польових умовах.

Застосування спектрофотометрів має і свої недоліки, такі як висока вартість обладнання, потреба у кваліфікованому персоналі та необхідність попередньої, ретельної підготовки проб та стабільних умов роботи.

Отже, методи та прилади кольориметрії займають ключове місце в моніторингу екологічного стану навколишнього середовища. Їх відносна дешевизна, точність, універсальність та можливість використання в польових умовах роблять кольориметричний метод ключовим і сучасному екологічному моніторингу. Візуальна кольориметрія широко поширена як експрес-метод проведення аналізу, який широко застосовується у вигляді тест-смужок та портативних наборів. Цей метод швидкий та дешевий, характеризується мінімальними вимогами до обладнання та можливістю застосування в польових умовах. У цьому методі проблема неточності вимірювань заключається в суб'єктивності зорового сприйняття, що значно знижує точність результатів. Тому, метод візуальної кольориметрії найкраще підходить для попередніх досліджень та масових скринінгових заходів при оцінці екологічного стану навколишнього середовища.

Застосування фотоколориметрів являє собою наступний етап розвитку досліджень. Завдяки використанню фотоелементів та стандартних світлофільтрів можна забезпечити об'єктивність вимірювань. Такий принцип роботи фотоколориметрів дозволяє оцінювати концентрації патогенних речовин в навколишньому середовищі у лабораторних, чи напівпольових умовах. Суттєвими недоліками залишається обмеженість спектрального діапазону та середня точність [6, 10]. Крім того, на точність результатів вимірювання суттєво впливає якість освітлення. Зміна спектрального складу та інтенсивності освітлення часто приводить до вагомих помилок у кольоровій оцінці. Також, фотоколориметри потребують регулярного повторного калібрування, для забезпечення точності вимірювань.

Використання спектрофотометрів забезпечує принципово інший рівень точності та відтворюваності результатів досліджень. Оскільки спектрофотометри здатні охоплювати широкий спектральний діапазон світлових хвиль, їх використання дає можливість досліджувати навіть безбарвні зразки та проводити багатокомпонентний аналіз. Саме ці прилади забезпечують точність результатів вимірювань, що відповідають міжнародним стандартам. Недоліками використання спектрофотометрів залишається необхідність залучення кваліфікованого персоналу, висока вартість обладнання, а також необхідність попередньої підготовки досліджуваних зразків. Вагомим недоліком використання спектрофотометрів

трів також є зміщення довжини хвилі, що приводить до неточності результатів. Також серед недоліків можна виділити залежність результатів від стабільності джерела освітлення та температури [6].

Висновки. У статті проведено огляд кольориметричного методу оцінки екологічного стану навколишнього середовища, його методів та приладів. Розглянуто останні наукові здобутки у галузі кольориметрії та моніторингу навколишнього середовища, проведено їх аналіз. Проведено огляд та ана-

ліз основних методів кольориметрії, наведено їх основні принципи, переваги та недоліки, оцінено вагу цих методів у сучасному моніторингу екологічного стану навколишнього середовища. Проведено огляд та метрологічний аналіз основних приладів кольориметрії, оцінено переваги та недоліки використання кожного з видів приладів, наведено існуючі проблеми точності, з якими стикаються науковці при використанні кольориметричного методу оцінки екологічного стану навколишнього середовища.

Список літератури:

1. Боголюбов В.М., Сальнікова А.В., Сальнікова О.В. Моніторинг довкілля: навчальний посібник. Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2010. 156 с.
2. Colorimetry and Optical Sensing. *Chemosensors*. 13(5). 163. 2025. MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors13050163>.
3. Comparative Evaluation of Colorimetric Sensors for Environmental Monitoring. *International Journal of Smart and Nano Materials*. 2025. Taylor & Francis. DOI: <https://doi.org/10.1080/17518253.2025.2548507>.
4. Low-cost and easy-to-use: A portable photometer for environmental monitoring. *Microchemical Journal*. 198. 107677. 2025. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.107677>.
5. Recent advances in paper-based analytical devices (PADs) for environmental monitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, 2025. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06636-6>.
6. Recent Progress in Smartphone-Based Colorimetric Detection for Environmental Monitoring. *Sensors*. 23(5). 2749. 2023. MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23052749>.
7. Comparative Analysis of Low-Cost Portable Spectrophotometers for Colorimetric Accuracy. *Sensors*. 24(24). 8208. 2024. MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24248208>.
8. Spectrophotometric Analysis of Nitrate and Phosphate Contamination in Water Samples. *Science of the Total Environment*. 2025. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.1704150>.
9. Use of Photometric Colorimetry in Environmental Monitoring. *Наукові праці СумДУ. Серія Хімія*. №2. 2022. С. 190. URL: https://chem.teset.sumdu.edu.ua/images/articles/2022/stpv-2022_2.pdf.
10. Validation of Portable Spectrophotometers in Environmental Analysis. PMC – National Center for Biotechnology Information, 2025. PMID: 12251617. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12251617>.

Valuzhenych O.O., Klyuchnyk I.I. MODERN COLOURIMETRY DEVICES IN MONITORING THE ECOLOGICAL STATE OF THE ENVIRONMENT. METROLOGICAL ANALYSIS AND ACCURACY ISSUES

The article is devoted to the ecological state of the environment, which is one of the key aspects of sustainable development of society. In addition, high-quality monitoring of the state of the environment directly affects the timeliness and expediency of environmental protection measures and the rational use of natural resources.

The article discusses colorimetric methods for assessing the quality of the environment. They occupy an important place among analytical control methods. Simplicity, accessibility, relative cheapness, and high speed of analysis have led to the widespread use of the colorimetric method in assessing the state of the environment. In addition, these characteristics of the method allow it to be used even in field conditions, which greatly simplifies the process of assessing the state of the environment. This aspect is especially important for public organisations and educational projects that seek to participate in monitoring the ecological state of the environment.

Research shows that over time, the range of modern colorimetry tools has been actively expanding, from test strips to portable photometers and spectrophotometers, and even mobile applications for determining pollutant concentrations. Such a variety of methods and devices opens up wide opportunities for rapid and high-quality assessment of the ecological state of the environment, even in field conditions. At the same time, such widespread availability of modern devices and tools may be accompanied by a number of metrological problems that affect the results of research, their interpretation and reproducibility. The study identified the following potential problems:

- discrepancies in measurement results between budget and expensive measuring instruments;
- the influence of external factors on the interpretation of measurement results (illumination, temperature, subjectivity of visual perception);
- the lack of a unified approach to assessing errors and uncertainties in measurement results.

Key words: environmental monitoring, colorimetry, environment, measurement, research, pollution, error, instruments.

Дата надходження статті: 22.09.2025

Дата прийняття статті: 13.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Невлюдов І.Ш.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Нікітін Д.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Стрілець Р.Є.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Валюженич О.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНИМ 3D-ДРУКОМ

Стаття присвячена дослідженню проблеми автоматизації процесів фотополімерного 3D-друку, що на сучасному етапі набуває особливої актуальності у зв'язку з широким розповсюдженням адитивних технологій у різних галузях промисловості. У статті розкрито особливості застосування 3D-друку не лише для створення прототипів чи одиничних виробів, а й у серійному виробництві, що зумовлює зростаючі вимоги до ефективності, стабільності та надійності технологічних процесів. Розглянуто необхідність зменшення частки ручних операцій, серед яких завантаження матеріалу чи вилучення готових виробів, та доведено, що найбільш критичним завданням є забезпечення автоматизованого контролю якості деталей у процесі друку. З'ясовано, що стандартні 3D-принтери, які за своєю природою є верстатами з числовим програмним керуванням, виконують більшість операцій автоматично, однак залишаються залежними від оператора у питаннях контролю відповідності параметрів якості. Визначено, що відсутність системи зворотного зв'язку призводить до необхідності застосування оптичного нагляду, що унеможливує повноцінний моніторинг процесу для ряду фотополімерних технологій, зокрема SLA, DLP, LCD, SLM, PolyJet, MJ. Розкрито ключову проблему, яка полягає в тому, що модель у початкових етапах друку повністю занурена у фотополімерну смолу, що не дозволяє здійснювати візуальний контроль. Доведено, що це створює ризики пізнього виявлення дефектів, коли друк триває безперервно протягом декількох годин або навіть діб, а виявлення браку можливе лише після завершення виготовлення. У статті визначено перспективи створення систем автоматизованого керування фотополімерним 3D-друком, здатних забезпечити моніторинг якості виробів у реальному часі, а також регулювання параметрів процесу залежно від властивостей фотополімеру та геометрії моделі. З'ясовано, що впровадження таких систем дозволить значно підвищити продуктивність технології, скоротити час виготовлення деталей, знизити ймовірність браку та покращити відтворюваність результатів. Розкрито напрями застосування фотополімерних технологій у медицині, ювелірній справі, приладобудуванні та ливарному виробництві, де автоматизація контролю має принципове значення для забезпечення високої якості кінцевих виробів.

Таким чином, у статті доведено, що розробка системи автоматизованого керування процесами фотополімерного 3D-друку є актуальною та необхідною науково-технічною задачею. Її реалізація сприятиме інтеграції адитивних технологій у масштабне промислове виробництво, забезпечить підвищення ефективності виробничих процесів і відкриє нові можливості для розвитку сучасних галузей промисловості.

Ключові слова: 3D-друк, фотолітографія, LCD, система керування технологічним процесом, моделювання, адитивне виробництво, виробництво.

Постановка проблеми. Незважаючи на активний розвиток адитивних технологій, фотополімерний 3D-друк залишається складним у керуванні процесом затвердіння матеріалу під дією світлового випромінювання. В існуючих системах відсутні універсальні алгоритми, що забезпечують автоматичний контроль параметрів друку, таких як інтенсивність та тривалість експонування, товщина шару, швидкість переміщення платформи, а також рівномірність полімеризації по всій робочій площині. Крім конструктивних рішень обладнання, необхідно також визначити аналітичні залежності між технологічними параметрами експонування, оптичними характеристиками фотополімеру, точністю відтворення геометрії моделі та механічними властивостями готового виробу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фотополімерний 3D-друк на основі LCD-технології стрімко розвивається завдяки своїй здатності забезпечувати високу точність та деталізацію виготовлених моделей. Якість результату друку при цьому значною мірою залежить від ефективної роботи системи керування – апаратно-програмного комплексу, що забезпечує синхронізацію всіх елементів друку.

Якісні показники цієї системи визначаються рядом критеріїв, таких як точність позиціонування, стабільність температурного режиму, ефективність контролю експозиції, швидкість друку та здатність до повторюваного відтворення моделей. Для подальшої роботи необхідно розглянути кожен із цих аспектів, наведемо приклади з досліджень та висвітлимо підходи до оптимізації системи керування [1, 2].

Точність позиціонування. Одним із ключових показників системи керування є її здатність забезпечувати точне та стабільне позиціонування платформи друку з виробом, що друкується, та оптичної системи. У фотополімерному друці навіть незначне відхилення по координатах може спричинити розмиття шарів, деформації геометрії та втрату дрібних деталей [3, 4].

Сучасні принтери зазвичай оснащуються лінійними направляючими з високою точністю та кроковими двигунами, які керуються мікроконтролером. Забезпечення точності до 5-10 мікронів є критично важливим, особливо для моделей з великою кількістю дрібних елементів. Важливо також враховувати зворотний зв'язок системи – наявність датчиків положення дозволяє контролювати рух платформи та своєчасно реагувати на механічні або програмні відхилення. Також до проблем позиціонування можна віднести занадто сильне прилипання виробу,

що друкується до прозорого матеріалу дна ванни, що може призвести до пропуску шарів та подальшого відривання виробу від платформи.

З точки зору теорії автоматичного управління цей параметр описується як статична похибка системи. Вона виникає при перехідних процесах або в усталеному режимі, коли вихід не точно відповідає заданому значенню. Типовою моделлю є система з керуванням положенням (наприклад, положення платформи по осі Z). Передаточна функція включає пропорційне, інтегральне або ПІД-регулювання для зменшення похибки. Ціллю оптимізації є мінімізація усталеної похибки до нуля ($\epsilon \rightarrow 0$) або зменшити її до допустимого рівня. Для практичної реалізації можливе застосування датчиків положення та ПІД-регулятора дозволяє точно тримати координати, навіть при змінному навантаженні та зміні швидкості руху.

Стабільність температурного режиму. Температура фотополімерної смоли має незначний вплив на її в'язкість, швидкість полімеризації та якість затвердіння шарів. Надмірне охолодження уповільнює реакцію та спричиняє неповне затвердіння, тоді як перегрів – до передчасної полімеризації, розширення смоли, утворення бульбашок та інших дефектів. Всі ці явища є незначними але висока температура досить сильно впливає на плівкові матеріали дна ванни. При підвищенні температури збільшується адгезія між плівкою дна ванни та виробом, що друкується. Це також може збільшити вірогідність відриву виробу від платформи [5]. З точки зору теорії автоматичного управління це класичне завдання регулювання температури як керованого параметра. Математична модель може бути представлена як диференційне рівняння теплопередачі, яке описується передаточною функцією низькопропускового фільтра. Система керування це ПІ або ПІД-регулятор з використанням датчиків (наприклад, термістора) для вимірювання температури. Критеріями керування є мала перерегуляція, короткий час перехідного процесу, висока стійкість. Реалізація контролера зворотного зв'язку дозволяє підтримувати температуру смоли в межах $\pm 0,5^\circ\text{C}$, незважаючи на зовнішні збурення.

Контроль експозиції включає в себе як тривалість, так і інтенсивність УФ-випромінювання. Неправильно підібрані параметри можуть призвести до недополімеризованих шарів (що знижує механічну міцність виробу) або до «пересвічування» (викликає розтікання полімеру за межі потрібного контуру). Система керування повинна мати можливість точно задавати час експозиції для кожного шару, а також інтенсивність світла – зазви-

чай це реалізується через широтно-імпульсну модуляцію (PWM) світлодіодів або цифрове керування драйверами. Деякі системи додатково реалізують зворотний зв'язок від фотодатчиків, що дозволяє автоматично коригувати світловий потік при зміні зовнішніх умов або старінні світлодіодів [6, 7].

З точки зору теорії автоматичного управління це керування інтенсивністю впливу на об'єкт (енергетичним параметром), часто моделюється як система з інтегруючим елементом. Модель можна представити як реакцію світлочутливої смоли на енергію світла – інтегральна залежність (кумулятивний ефект). Реалізація виконується формуванням широтно-імпульсної модуляції сигналу (ШІМ) з фіксованою або змінною частотою.

Метою є дозування подачі енергії, яка відповідає необхідному ступеню полімеризації (контроль за часом інтеграції). Контролер задає точний час експозиції, а фотодатчики контролюють яскравість світла, утворюючи контур зворотного зв'язку. Швидкість друку. Швидкість друку визначає продуктивність пристрою, проте не повинна досягатися за рахунок погіршення якості. Система керування дозволяє налаштувати індивідуальні параметри для різних типів моделей: висота шару, швидкість підйому платформи, паузи між шарами тощо. Додатково впроваджується динамічна адаптація швидкості в залежності від площі експонованої області – якщо шар містить велику суцільну поверхню, необхідно дати більше часу для її затвердіння [8].

З точки зору теорії автоматичного управління це показник динаміки системи, що характеризує швидкість досягнення нового стану. Критеріями якості є час перехідного процесу (t_p), перерегулювання (σ), аперіодичність. Оптимізація являє собою компроміс між швидкістю та стабільністю; надто швидка система може втрачати стабільність. Для реалізації застосовуються адаптивні алгоритми, які корегують швидкість друку в реальному часі залежно від площі шару або складності геометрії. Відтворюваність результатів. Якість 3D-друку визначається не лише окремими вдалимими результатами, а й здатністю стабільно повторювати їх. Для цього система керування повинна включати в себе збереження параметрів сеансів, автоматичну діагностику та відновлення процесу після збою. Наявність інтерфейсів для збереження логів, підключення до мережі та моніторингу в реальному часі дозволяє не лише виявляти проблеми, а й навчати систему на основі попередніх результатів [9, 10].

З точки зору теорії автоматичного управління даний показник описується через робастність –

здатність системи зберігати стійкість і точність при зміні параметрів або збуреннях. Модель є нечіткою визначеною системою з параметричною невизначеністю. Для реалізації використовується підхід з побудовою адаптивних систем управління або застосуванням стійких регуляторів (робастне ПІД-керування). Практична реалізація забезпечується автоматичним калібруванням, логуванням параметрів, виявленням збоїв, самодіагностикою – все це підвищує робастність системи друку.

Якісна система керування є критичним елементом для досягнення високої точності, стабільності та надійності у фотополімерному LCD-друці. Інтеграція апаратних і програмних рішень, включаючи системи зворотного зв'язку, температурний контроль, гнучкі налаштування експозиції та адаптивну швидкість друку, значно покращує результати. Тільки завдяки детальному аналізу всіх складових можна створити систему, яка забезпечить конкурентоспроможну якість друку [5].

Проведений аналіз джерел інформації, аналіз особливостей технології фотополімерного 3D-друку та системи керування фотополімерного 3D-друку, матеріалів, що використовуються в цій технології та показників якості як системи керування так і якісні показники фотополімерного 3D-друку, що дозволило визначити недоліки технологічного процесу фотополімерного друку та системи керування:

- використання великої кількості різноманітних фотополімерів з різними фізичними та хімічними властивостями викликає необхідність визначення технологічних параметрів для кожного фотополімеру;

- обрані методи керування мають велику складність контролю друку в реальному часі та необхідність присутності людини для оцінки якості друку та подальшої обробки моделі;

- велика кількість технологічних параметрів мають значний вплив на якісні показники друкованих моделей (відхилення розмірів, наявність дефектів).

Тобто технологія фотополімерного друку, незважаючи на значний розвиток та набуття поширеності у різних сферах використання, потребує подальшого вдосконалення методів автоматизованого контролю, систем керування фотополімерного 3D-друку, визначення показників якості системи керування та фотополімерного 3D-друку з подальшим їх аналізом та дослідженням для розробки методів та засобів автоматизованих систем керування адитивною технологією фотополімерного 3D-друку.

Виклад основного матеріалу. Для розробки системи автоматизованого керування процесом відривом фотополімерної моделі від плівки необхідно визначити основні складові елементи цієї системи керування.

Для цього необхідно розробити схему системи керування технологічним процесом фотополімерного друку [11, 12]. Загальна структура автоматизованої системи керування передбачає забезпечення контролю та стабільності основних показників якості надрукованих деталей, зокрема шорсткості поверхні та відповідності геометричних розмірів заданим.

Загальна схема автоматизованого керування процесом фотополімерного 3D-друку зображено на рис. 1.

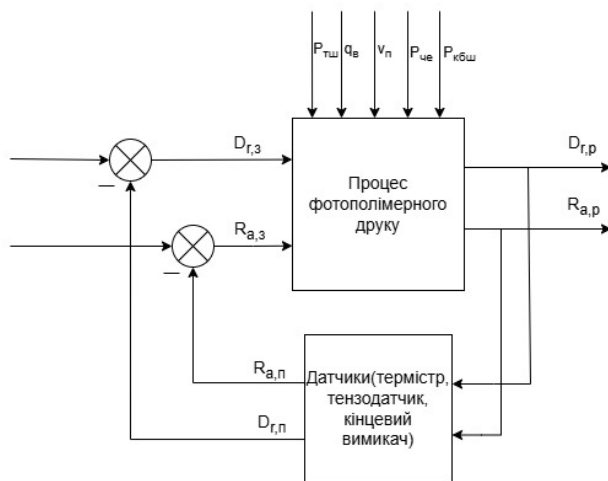


Рис. 1. Загальна схема керування процесом фотополімерного друку

Загальна схема автоматизованого керування передбачає порівняння за допомогою датчиків зворотнього зв'язку (термістор, тензорезистор, кінцевий вимикач) заданих показників якості друку (шорсткості поверхні R_a , точності збереження заданих розмірів Dr) з вихідними та подальшим їх корегуванням. На систему керування впливають технологічні параметри, які задаються у слайсері, такими параметрами є кількість базових шарів, товщина шару, час експонування, швидкість руху платформи та інші характеристики. Математично структура моделі має наступний вигляд:

$$D_{r,p}, R_{a,p} = F(D_{r,z}, R_{a,z}, P_{тш}, q_v, v_p, P_{че}, P_{кбш}) \quad (1)$$

де, $D_{r,p}$ – отримані розміри деталі; $R_{a,p}$ – отримана шорсткість деталі; $D_{r,z}$ – задані розміри деталі; $R_{a,z}$ – задана шорсткість деталі; $P_{тш}$ – параметри товщини шару; q_v – інтенсивність експонування УФ світлодіода; v_p – параметри швидкості пере-

міщення платформи; $P_{че}$ – параметри часу експонування; $P_{кбш}$ – параметри кількості базових шарів.

Виходячи із загальної структури САК ТП фотополімерного друку можливо визначити основні складові АСК ТП фотополімерного друку. До складу АСК ТП входять наступні забезпечення [13, 14]:

- функціональне забезпечення, яке відповідає за формування УФ випромінювання, формування зображення на екрані(маски), перемішування та визначення розташування платформи по осі Z;

- інформаційне забезпечення, відповідає за технологічні параметри, що задаються в слайсері перед друком і впливають на технологічний процес, такими параметрами є час експонування, швидкість переміщення, товщина шару, кількість базових шарів та ін.;

- математичне забезпечення охоплює математичні моделі процесу друку, в результаті аналізу та моделювання у першому та другому розділі було визначено, що для покращення характеристик процесу друку необхідно врахувати розроблену регресійну модель відхилень розмірів від технологічних параметрів, модель керування за силою відриву та САК процесу відриву від температури;

- алгоритмічне забезпечення містить алгоритм перемішування, алгоритм визначення сили відриву від площі в процесі друку, алгоритм експонування шару, алгоритм визначення початкового положення платформи;

- технічне забезпечення містить модуль експонування, що включає в себе світлодіодну матрицю, модуль відображення, що включає в себе екран (маску), модуль переміщення, що включає в себе двигун, драйвер, модуль контролю за силою відриву, що включає в себе тензодатчик та модуль контролю за температурою що включає в себе термістор і плату керування.

Основними елементами, що визначають збереження якісних показників та необхідні для покращення системи керування є елементи, що відповідають за контроль сили відриву та контроль температури фотополімера, яка впливає на швидкість полімеризації і тим самим на силу відриву від плівки.

На основі проведеного регресійного аналізу для покращення показників якості керування, в САК фотополімерним 3D-друком пропонується в якості математичного забезпечення модель керування за силою відриву від площі та САК модель процесу відриву за температурою [15].

В алгоритмічному забезпеченні пропонується алгоритм визначення сили відриву від площі на

основі алгоритму перемішування. Для забезпечення вищевказаних алгоритмічного та математичного забезпечення необхідно створити програмний комплекс на основі Arduino з використанням технічних засобів для забезпечення цілей автоматизованої системи керування фотополімерним 3D-друком.

Для досягнення поставленої мети необхідно побудувати функціональну схему автоматизованого керування фотополімерним 3D-друком. Ця схема містить наступні елементи:

- плата керування, яка надсилає сигнали на кроковий двигун, екран та світлодіодну матрицю;
- світлодіодна матриця, яка потоком УФ випромінювання ініціює процес полімеризації;
- екран (маска), який виводить зображення шару;
- кроковий двигун, який відповідає за систему переміщення;
- в якості зворотнього зв'язку по якому здійснюється контроль міститься тензодатчик, кінцевий вимикач та термістор;

– в якості об'єкта керування – процес керування фотополімерним 3D-друком.

Функціональна схема процесу фотополімерного 3D-друку зображена на рис. 2.

Визначення вхідних та вихідних параметрів є ті ж самі параметри, що і на узагальненій схемі САК ТП фотополімерного друку: вхідними параметрами є задані розміри та шорсткість, вихідними параметрами є розраховані значення шорсткості та відхилення розмірів.

Для структурної схеми системи керування було визначено передатні функції її елементів, експериментально підібрано коефіцієнти та постійні часу. Структурна схема системи з визначеними передатними функціями зображена на рис. 3.

В подальшому використовуючи загальну схему MatLab Simulink, що зображена на рис. 4, було проведено перетворення схеми для знаходження загальної передатної функції системи керування.

Таким чином використовуючи ПЗ Matlab за допомогою наступних команд була порашована загальна передатна функція з використанням кое-

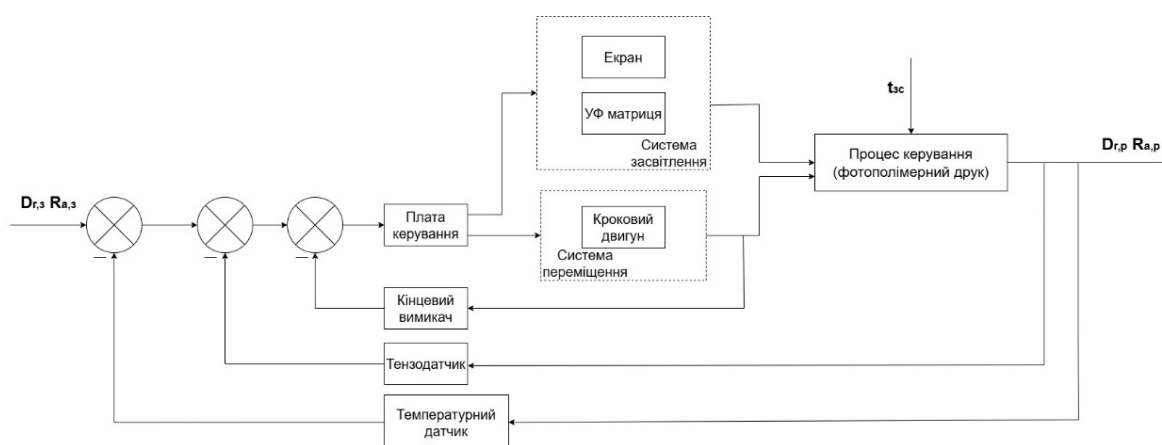


Рис. 2. Функціональна схема системи керування процесом фотополімерного 3D-друку

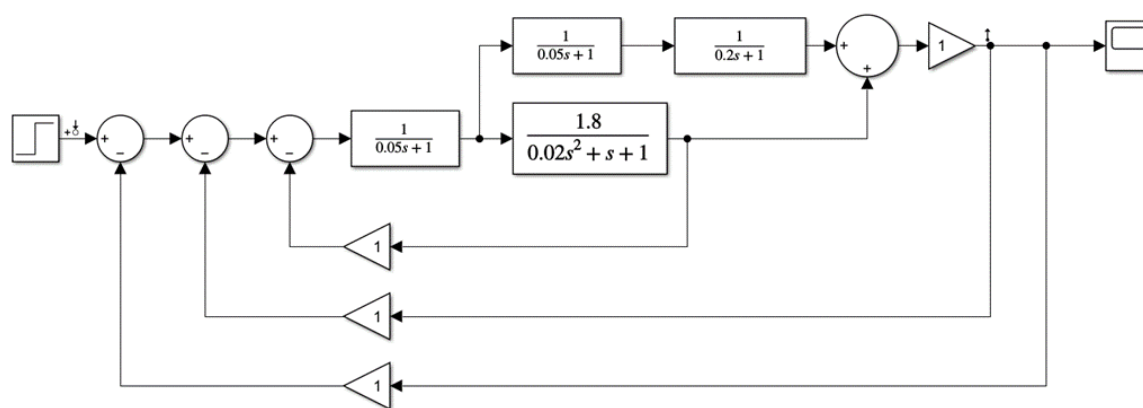


Рис. 3. Схема для моделювання фотополімерного друку у ПЗ MatLab Simulink

фіцієнтів та визначені полюса та нулі командою `pole(wend)`.

В результаті використовуючи команду `rzmar(Wкінц)` було отримано графік, що зображений на рис. 5 а. Згідно діаграми можливо зробити висновок, що система є стійкою. Також використовуючи для системи пакет лінеаризації було отримано годограф Найквіста, що зображений на рис. 5 б.

Виходячи з отриманого годографа та критерія стійкості Найквіста можливо зробити висновок що система є стійкою. Отримана перехідна характеристика системи зображена на рис. 6 а. Також було отримано частотні характеристики системи, що зображені на рис. 6 б.

В результаті дослідження системи керування фотополімерним 3D-друком можливо зробити

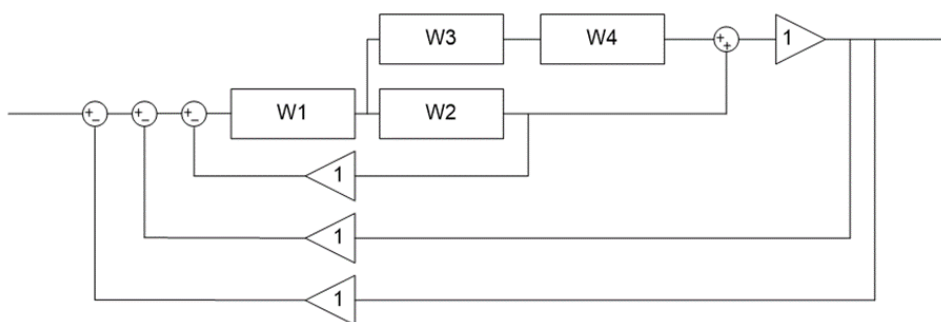


Рис. 4. Загальна схема для знаходження передавальної функції системи керування

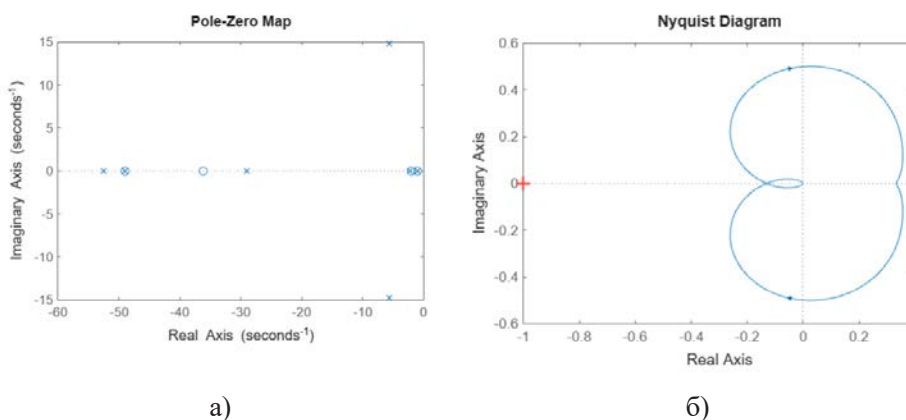


Рис. 5.
а – діаграма нулів та полюсів моделі керування; б – годограф Найквіста

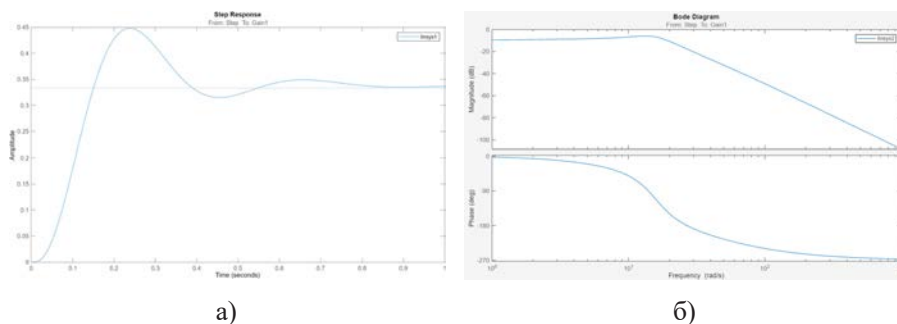


Рис. 6.
а – перехідна характеристика системи;
б – частотні характеристики системи

висновок, що з додаванням в систему керування зворотнього зв'язку у вигляді тензодатчика та термістора система є стійкою.

Висновки. У статті запропоновано нову систему автоматизованого керування фотополімерним 3D-друком, яка динамічно регулює параметри експонування залежно від властивостей матеріалу та геометрії моделі. Це досягається завдяки адаптивним алгоритмам, що контролюють інтенсивність світлового потоку, час полімеризації шарів, швидкість платформи та рівномірність затвердіння.

Система забезпечує стабільну якість друку, зменшення внутрішніх напружень і підвищення міцності виробів. Вперше реалізовано інтеграцію датчиків оптичної густини, температури та тензодатчиків, що дозволяють у режимі реального часу

контролювати процес відриву та коригувати параметри друку. Запропонована методика включає:

- розробку загальної системи автоматизованого керування;
- математичне моделювання процесу відриву моделі від плівки;
- імітаційне дослідження цього процесу в Python із використанням тензодатчика;
- моделювання елементів системи у MATLAB Simulink.

Результати сприяють підвищенню точності та надійності виготовлення деталей, зменшенню дефектів і часу друку. Основним підсумком є створення адаптивної системи, що підвищує якість, відтворюваність і економічність фотополімерного 3D-друку.

Список літератури:

1. Нікітін Д.О., Коротун Є.В. Дослідження параметрів фотополімерної смоли для адитивного 3D-друку. Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики. Матеріали II Міжнародної наукової конференції. Кривий Ріг, 10 січня 2024 р. Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. с. 292–294. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-571210.36074/mcnd-19.01.2024>.
2. Нікітін Д.О. Розробка моделі керування температурою фотополімерної смоли на базі LCD-технології 3D-друку. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. № 1(75). pp. 31–37.
3. Zhang J., Xiao P. 3D Printing of Photopolymers. *Polymer Chemistry*. 2018. Vol. 9. pp. 1530–1540.
4. Ambrosio D., Gabrion X., Malécot P., Amiot F., Thibaud S. Influence of manufacturing parameters on the mechanical properties of projection stereolithography–manufactured specimens. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106. pp. 265–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04415-5>.
5. Xue D., Zhang J., Wang Y., et al. Digital light processing-based 3D printing of cell-seeding hydrogel scaffolds with regionally varied stiffness. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2019. Vol. 5. pp. 4825–4833.
6. Zhou L.Y., Fu J., He Y. A review of 3D printing technologies for soft polymer materials. *Advanced Functional Materials*. 2020. Vol. 30. 2000187.
7. Layani M., Wang X., Magdassi S. Novel materials for 3D printing by photopolymerization. *Advanced Materials*. 2018. Vol. 30. e1706344.
8. Суберляк О.В., Скорохода В.Й., Семенюк Н.Б. Теоретичні основи хімії та технології полімерів. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. 340 с. ISBN 978-617-607-612-4.
9. Радченко С.Г. Методологія регресійного аналізу: монографія. Київ : Корнійчук, 2011. 376 с.
10. Важинський С.Е., Щербак Т.І. Методика та організація наукових досліджень. Суми : СумДПУ ім. А.С.Макаренка, 2016. 260 с.
11. Білей П., Адамовський М., Ханік Я., Довга Н., Сорока Л. Методологія наукових досліджень технологічних процесів. Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2003. 352 с.
12. Дефекти та вимоги до якості ІОТ. URL: <https://vseosvita.ua/library/embed/0100cue4-c3ba.docx.html>.
13. Варенко В.М. Основи аналітики: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2022. 248 с. ISBN 978-617-520-284-5.
14. Venkataswamy Reddy M. Statistical Methods in Psychiatry Research and SPSS. 2nd ed. Apple Academic Press, 2019. 442 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429023309>.
15. Noorani R. 3D Printing: Technology, Applications, and Selection. CRC Press, 2017. 271 p.

Nevlyudov I.Sh., Nikitin D.O., Strilets R.E., Valyuzhenych O.O. DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR PHOTO-POLYMER 3D PRINTING

The article is devoted to the study of the problem of automation of photopolymer 3D printing processes, which is becoming particularly relevant at the present stage due to the widespread use of additive technologies in various industries. The article reveals the peculiarities of using 3D printing not only for creating prototypes or single products, but also in serial production, which leads to growing demands for the efficiency, stability, and reliability of technological processes. The need to reduce the proportion of manual operations, including loading material or removing finished products, is considered, and it is proven that the most critical task is to ensure automated quality control of parts during the printing process. It has been found that standard 3D

printers, which are essentially numerically controlled machines, perform most operations automatically, but remain dependent on the operator for quality control. It has been determined that the absence of a feedback system leads to the need for optical surveillance, which makes it impossible to fully monitor the process for a number of photopolymer technologies, in particular SLA, DLP, LCD, SLM, PolyJet, and MJ. The key problem has been identified, which is that in the initial stages of printing, the model is completely immersed in photopolymer resin, which prevents visual inspection. It has been proven that this creates risks of late detection of defects when printing continues continuously for several hours or even days, and defects can only be detected after production is complete. The article identifies the prospects for creating automated control systems for photopolymer 3D printing that are capable of monitoring product quality in real time, as well as adjusting process parameters depending on the properties of the photopolymer and the geometry of the model. It has been found that the introduction of such systems will significantly increase the productivity of the technology, reduce the time required to manufacture parts, reduce the likelihood of defects, and improve the reproducibility of results. The areas of application of photopolymer technologies in medicine, jewellery, instrument making and foundry production, where automation of control is of fundamental importance for ensuring high quality of final products, are revealed. Thus, the article proves that the development of an automated control system for photopolymer 3D printing processes is a relevant and necessary scientific and technical task. Its implementation will contribute to the integration of additive technologies into large-scale industrial production, ensure the improvement of production processes, and open up new opportunities for the development of modern industries.

Key words: 3D printing, photolithography, LCD, technological process control system, modelling, additive manufacturing, production.

Дата надходження статті: 19.09.2025

Дата прийняття статті: 03.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

UDC 621.396.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/07>**Vetoshko I.P.**National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

EFFICIENT RESOURCE ALLOCATION IN 5G SA: IMPACT OF SCHEDULING ON GBR AND NON-GBR TRAFFIC

The rapid development of fifth-generation networks in the Standalone (5G SA) variant poses new challenges for ensuring quality of service (QoS) in mixed traffic conditions, in particular guaranteed (GBR) and non-guaranteed (Non-GBR) traffic. VoNR (Voice over New Radio) voice services are particularly sensitive to latency, jitter and packet loss parameters, requiring the implementation of more flexible resource management mechanisms. Traditional scheduling algorithms, such as Round Robin, focus on uniform resource allocation and do not take into account service class or QoS dynamics, leading to instability of voice streams in a variable radio environment.

The article proposes a simulation approach to analysing resource scheduling logic in a 5G SA network using two schemes as examples: Round Robin and QoS-aware Adaptive. The study covers time profiles of throughput, latency, and tail distributions (p95/p99 percentiles) for both traffic classes. It is shown that the adaptive approach stabilises voice traffic near the service benchmark, reduces delay tails and ensures SLA compliance for GBR while controlling temporary reductions in Non-GBR performance. Integral metrics, including Jain's fairness index and cumulative distribution functions (CDF) of throughput, were used to verify the results, confirming the effectiveness of QoS-oriented scheduling.

The results of the study demonstrate that the implementation of adaptive schedulers in 5G SA improves the resilience of VoNR to radio channel fluctuations and ensures predictable service quality without the need for rigid resource reservation. The findings can be used to improve traffic management policies in modern 5G networks.

Key words: VoNR, 5G Standalone, QoS, GBR, Non-GBR, adaptive scheduling, Round Robin, Adaptive scheduling (QoS-aware), SLA, delay, jitter, packet loss, throughput, Jain's fairness index, CDF, simulation modelling.

Formulation of the problem. The introduction of 5G Standalone (SA) networks creates conditions for the full use of a wide range of services, among which VoNR (Voice over New Radio) voice connections are of critical importance. Unlike transitional technologies, the implementation of VoNR in a standalone 5G architecture places all responsibility for ensuring quality of service (QoS) on radio access resource management mechanisms. This places new demands on schedulers, who must ensure low latency and stable QoS metrics (delay, jitter, loss), but also take into account the specifics of mixed GBR/Non-GBR traffic, which is characteristic of modern telecommunications systems.

Traditional scheduling schemes, such as Round Robin, focus on uniform resource allocation and do not take into account service class or historical QoS behaviour. As a result, during peak times, voice

traffic encounters excessive delays and losses, which reduces call quality. At the same time, QoS-aware approaches require a balance between guaranteed services (GBR) and best-effort flows (Non-GBR) to avoid prolonged degradation of secondary traffic. In addition, the complexity of the task is due to the need to simultaneously fulfil several interrelated conditions: stable compliance with SLAs for voice flows, minimisation of delay and jitter tails, limitation of unproductive retransmissions (HARQ), and maintenance of a high fairness index in the distribution of resources between traffic classes. Existing approaches tend to focus either on the stability of a single service class or on overall spectral efficiency, ignoring the complex impact of mixed traffic.

Thus, there is a need to develop and research adaptive schedulers capable of taking into account service criticality, radio conditions dynamics, and QoS

© Vetoshko I.P., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

parameter history in real time. Solving this problem is a key step towards ensuring high-quality VoNR voice connections and efficient resource utilisation in 5G Standalone networks.

Analysis of recent research and publications. The issue of quality of service (QoS) in fifth-generation (5G) mobile networks, especially in Standalone architecture, has received considerable attention in recent studies. Works [1, 6, 7] highlight the features of VoNR voice service implementation and approaches to improving their quality in conditions of variable radio channel state. The authors focus on key QoS indicators – delay, jitter, packet loss – and emphasise the need for adaptive resource scheduling to maintain voice service stability.

An important place is occupied by 3GPP standards [3, 4, 8, 13], which define the architecture of the 5GS system, describe the principles of operation of NR/NG-RAN and IP Multimedia Subsystem (IMS), and regulate the mechanisms of multi-level QoS provision. These documents form the technical basis for the development and implementation of resource management algorithms in 5G networks. Works [9, 10] propose adaptive resource allocation schemes using CQI and MCS, which demonstrate effectiveness in reducing delays and increasing throughput. At the same time, [11, 12] present industry approaches to building QoS architecture for 5G services, with a focus on the integration of resource management mechanisms and standardised traffic profiles. Recent studies [2, 5, 14] emphasise that QoS-aware scheduling is critical for voice traffic under mixed load conditions (GBR/Non-GBR). They confirm the advantages of adaptive approaches over classical uniform distribution schemes, while noting the trade-offs between flow performance and resource allocation fairness.

In general, existing publications form a solid theoretical foundation, but most works either focus on general aspects of 5G architecture or are limited to analysing a single class of service. The issue of comprehensive comparison of scheduling logics in mixed GBR/Non-GBR load scenarios remains insufficiently researched, which is the subject of this article.

The purpose of this study is to investigate the impact of resource scheduling logic in a 5G Standalone network on the quality of service for mixed traffic with guaranteed (GBR) and non-guaranteed (Non-GBR) speeds. The main focus is on modelling and comparing Round Robin and QoS-aware Adaptive schemes in the context of maintaining service requirements for voice streams over IMS/VoNR. The work aims to analyse the time profiles of

throughput, delay and QoS variability for different traffic classes in order to determine the ability of adaptive algorithms to provide SLAs for voice services without excessive degradation of Non-GBR traffic performance. This approach allows striking a balance between prioritising critical services and fair resource allocation, as well as forming practical conclusions for improving scheduling policies in real 5G SA networks.

Summary of the main research material.

Mixed GBR/Non-GBR load in 5G SA and scheduling logic (RR vs Adaptive). The study considers mixed GBR/Non-GBR load in 5G Standalone (NR, TDD) with voice service over IMS. Traffic is carried over QoS flows with 5QI, which determines the acceptable delay, priority and (for GBR) guaranteed speed; 5QI = 1 is used for speech, 5QI = 5 for IMS signalling, and associated media streams with lower requirements can have 5QI = 6-9 [1]. This service criticality ‘label’ passes through the protocol layers and directly influences the scheduler's decision on the order and amount of PRB allocation in each time interval. To reproduce key resource allocation modes, two access plane logics are compared – uniform Round Robin (RR) and QoS-aware Adaptive – for both traffic classes. In the time series of throughput for GBR, an explicit benchmark of 50 Mbit/s is set, which allows quantitative tracking of deviations for each scheme; a set of scenarios (RR/Adaptive × GBR/Non-GBR) demonstrates how bandwidth time profiles change under different priorities and loads [2]. In this study, the GBR bearer is modelled as a synthetic high-bitrate service (50 Mbit/s) to stress-test scheduling under mixed traffic. It is not an IMS/VoNR voice GBR bearer; voice-related implications are assessed via latency/jitter/loss metrics, not GBR throughput values.

Within the proposed framework, 5QI is treated as a dynamic urgency signal: as cumulative delay or loss approaches service thresholds, the GBR traffic class is granted an additional share of PRBs even under deteriorating channel conditions; when CQI is favourable, resources are returned to Non-GBR. This aligns with ‘history-aware’ scheduling, where practical adaptive schemes consider not only instantaneous SNR/CQI but also QoS trends and short-term forecasts, augmented by heuristic adjustments under favourable radio conditions and service-class controls. Empirically, the multi-level response – channel state → QoS trend → prioritisation/transmission parameters – reduces losses, and avoids unnecessary UE energy expenditure during high-SNR phases [2].

The throughput time series reflect the expected asymmetry: for GBR with Adaptive, the curve stays close to 50 Mbit/s with minor fluctuations, while RR systematically underperforms, averaging around 40–42 Mbit/s. For Non-GBR, on the contrary, Adaptive gives way to GBR during peak loads: the achievable level remains around ~40 Mbit/s, while Round Robin often drops below 30 Mbit/s and is characterised by higher variability (Fig. 1). Such correlations between GBR and Non-GBR curves are a direct consequence of QoS prioritisation in dynamic resource allocation [3].

The time-varying delay pattern is equally revealing: GBR Adaptive shows a steady approach to the benchmark of ≈ 10 ms, while RR generates an increased average delay (>15 ms). For Non-GBR, Adaptive allows the delay to be maintained at ≈ 15 ms, while Round Robin exceeds 25 ms under high load. The overall conclusion is that ensuring SLA for voice requires dynamic QoS-aware scheduling, while the ‘blind’ uniformity of RR proves unsuitable for both GBR (due to non-compliance with targets) and Non-GBR (due to stretched queues at peaks) [3]. The ≈ 10 ms target is interpreted as the NR interface (RAN one-way) delay rather than an end-to-end PDB.

From a service architecture perspective, this is consistent with the role of IMS/VoNR: maintaining low radio latency at the gNB level directly affects call setup/maintenance time and subjective quality; accordingly, the sensitivity of the voice 5QI stream to delay tails requires prioritisation in channel degradation phases, which is implemented by an adaptive scheme. At the same time, the ‘price’ of such protection is fixed: at peak load moments, Non-GBR inevitably receives a smaller share of PRB, which manifests itself in a deterioration of instantaneous

performance. This compromise highlights the advisability of further improving adaptive rules, taking into account the short-term forecast of QoS/channel metrics [2].

Comparative analysis of throughput in RR and Adaptive scenarios. A comparison of throughput time series for four scenarios (RR/Adaptive $\times$ GBR/Non-GBR) reveals characteristic differences in service requirement fulfilment. For the GBR flow, adaptive logic stabilises the curve near the 50 Mbit/s benchmark, reducing the amplitude of fluctuations and the duration of deviations from the target level. For Round Robin, by contrast, there is a systematic underperformance with an average level of about 40–42 Mbit/s and more noticeable local dips (Fig. 1). This difference is a direct consequence of taking into account the class of service and queue state in the adaptive approach, which allows PRB to be reallocated in favour of GBR during critical intervals without rigid resource reservation [4].

For Non-GBR, the effect manifests itself as a ‘controlled concession’: during periods of increased load, the adaptive approach temporarily reduces the share of PRB in favour of GBR, which lowers the instantaneous throughput of the Non-GBR flow; outside of peaks, the resource is returned, and the Non-GBR curve stabilises at values higher than RR. In Round Robin, where the service class is ignored, both flows are in a common deficit – GBR does not reach the benchmark, and Non-GBR remains at even lower levels, with greater variability over time. In general, this corresponds to a negative correlation between the GBR and Non-GBR curves specifically for adaptive allocation, which reflects the prioritisation mechanism [2].

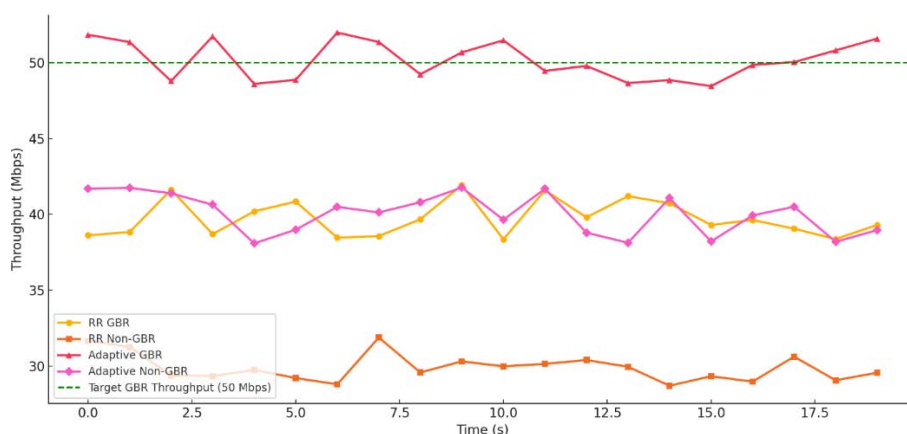


Fig. 1. Throughput comparison for GBR and Non-GBR traffic under different schedulers

From a scientific perspective, it is important to evaluate not only average values but also temporal characteristics of the throughput signals. At the trend level, the adaptive approach demonstrates less dispersion and a shorter transition process after local channel deteriorations: the return to the operating plateau occurs faster, which reduces the integral 'cost' of fluctuations for the voice stream. In terms of operational indicators, this is equivalent to a smaller proportion of time spent below the GBR benchmark and a lower coefficient of variation for Adaptive versus RR. Accordingly, for Non-GBR in adaptive mode, it is advisable to look not only at the averages, but also at the structure of the variability: interpeak intervals are characterised by higher predictability, while short load peaks contribute localised reductions without long 'trails'. The formal recording of observations is reinforced by the presentation of cumulative distributions [5]. The CDF of throughput for GBR with adaptive distribution shifts to the right and fits more closely to 50 Mbit/s, clearly demonstrating a higher probability of reaching/staying near the benchmark; for Round Robin, the curve for GBR is shifted to the left, with a 'heavier' left wing. For Non-GBR, the difference in CDF highlights the 'price of prioritisation': under Adaptive, the probabilities of high values at peaks are lower, but between peaks the curves are more compact, reflecting the controllability of redistribution.

A useful addition to Fig. 1 is the integrated metrics on the summary panel: the proportion of time during which GBR is below 50 Mbit/s; p5/p50/p95 throughput for each 'scheduler × class' combination; Jain's fairness index between classes (by PRB share) as a quantitative assessment of the compromise between 'GBR stability ↔ Non-GBR performance' [6]. Taken together, these metrics reinforce the graphical picture and allow conclusions to be drawn that are reproducible regardless of the choice of observation points. From the perspective of radio access mechanisms, the advantage of the adaptive approach comes from combining service class information (via 5QI) and the current radio state in the form of CQI/SNR: at moments of channel deterioration for voice, PRB reallocation and transmission parameter correction (including MCS change) occur earlier and with less 'inertia' than in neutral schemes. This explains the shallower depth and shorter duration of dips for GBR and, accordingly, better resistance to short-term fluctuations [7]. For Non-GBR, the result is controlled degradation at peaks without the accumulation of long queues, which is important for maintaining the overall efficiency of the system.

Summarising the results, the time series of throughput and their derived indicators confirm three key conclusions: firstly, the adaptive approach consistently maintains GBR at a level close to 50 Mbit/s throughout the observation interval; second, Round Robin systematically fails to meet GBR requirements and at the same time does not provide favourable conditions for Non-GBR, leaving both flows in a common deficit; third, the 'price' of adaptive prioritisation for Non-GBR is short-term and manageable, which is reflected in more compact CDF curves and lower inter-peak variability.

Time profiles of delay, jitter, and loss; implications for VoNR/IMS. Time profiles of delay for mixed traffic show fundamentally different behaviour depending on the scheduler class. For GBR, in the case of adaptive allocation, the values consistently approach the benchmark of ≈ 10 ms, which corresponds to compliance with QoS requirements during most observation intervals; with Round Robin, the average delay exceeds 15 ms. For Non-GBR, the adaptive approach maintains a level of ~ 15 ms, while RR peaks exceed 25 ms (Fig. 2). These differences are consistent with time series data and directly indicate the advantage of QoS-aware scheduling for services with guaranteed characteristics. This can be explained by the mechanism of head-of-line delay accumulation in neutral allocation schemes: when each active UE receives approximately the same share of PRBs, voice packet queues grow even during short-term channel deteriorations [8]. The adaptive approach uses service criticality 'tags' (5QI), so at critical moments for GBR, prioritisation is performed with correction of the PRB share and transmission parameters; with favourable CQI, the resource is returned to Non-GBR. This logic reduces the duration and depth of deviations from target values and prevents long 'trails' of delays, while maintaining overall spectral efficiency [9].

To quantify the behaviour of the distribution tails, the p95/p99 percentiles and the proportion of intervals exceeding the threshold values relevant to each service class are used (Table 1). For GBR, the adaptive scheme demonstrates a significant compression of the tails: p95 = 12.5 ms and p99 = 14.0 ms versus 22.0 ms and 27.0 ms in RR; the proportion of intervals above 10 ms is 28% (Adaptive) versus 88% (RR). For Non-GBR, the adaptive approach keeps the median at 15.3 ms with p95 = 20.8 ms and p99 = 24.5 ms and only 6% of intervals exceeding 25 ms, while RR has a median of 22.7 ms, p95 = 31.5 ms, p99 = 39.0 ms, and 42% of threshold exceedances [5]. This ratio confirms that adaptive prioritisation not only reduces

Table 1

Delay distribution tails for scheduler–traffic-class combinations

Scheduler	Traffic class	Median, ms	p95, ms	p99, ms	Proportion > threshold, %	Threshold value, ms
RR	GBR	16.8	22.0	27.0	88	10
Adaptive	GBR	10.2	12.5	14.0	28	10
RR	Non-GBR	22.7	31.5	39.0	42	25
Adaptive	Non-GBR	15.3	20.8	24.5	6	25

the average values for GBR, but also systematically ‘trims’ critical tails, while keeping Non-GBR within acceptable limits outside of peaks.

The practical effect manifests itself at the IMS/VoNR procedure level: reducing radio delay on the NR interface shortens the RAN component of call-setup latency (INVITE→200 OK) and the time to first 180/183 (early-media onset). The obtained p95/p99 profiles and exceedance rates confirm that QoS-aware scheduling provides greater predictability for both guaranteed services (GBR) and best-effort traffic (Non-GBR) during off-peak intervals without requiring strict resource reservation [10].

The further relationship between RAN and service quality can be conveniently described by the integral ‘threshold exceedance area’ for voice: this refers to the total time and depth of delay exceedances beyond the 10 ms limit. A comparison with Table 1 shows that the adaptive approach not only reduces p95/p99 for GBR, but also significantly reduces the duration of such episodes. This correlates well with practical quality indicators (in particular, subjective assessment of voice service), since it is the ‘tails’ and long episodes of threshold exceedance that are most painful for the user [11]. Prioritisation based on adaptive logic works in short bursts: when the head-of-line delay increases or there is a noticeable deficit to the GBR target parameters, the scheduler temporarily increases the

share of PRB for voice, and then restores the balance. This is confirmed by Table 2: the average PRB share is shifted in favour of GBR ($\approx 58/42\%$), but the fairness index remains high ($J \approx 0.975$), i.e. the asymmetry is controlled and temporary. In practice, it is precisely this ‘breathing’ behaviour that allows GBR queues to be removed without prolonged depletion of Non-GBR.

Table 2

Average PRB allocation by traffic class and Jain’s fairness index (RR vs Adaptive)

Scheduler	PRB for GBR, %	PRB for Non-GBR, %	Jain fairness Index (between classes)
RR	50.0	50.0	1.0000
Adaptive	58.0	42.0	0.9750

From an implementation standpoint, a two-loop design is advisable. The internal circuit monitors the ‘quality deficit’ for GBR and, if necessary, increases its priority; the external circuit maintains the framework – the minimum PRB share for Non-GBR at peaks and the upper limit of the instantaneous share for GBR – so that prioritisation does not ‘drag on’ after unloading. This combination explains why you have both low p95/p99 for GBR (Table 1) and a high fairness score (Table 2).

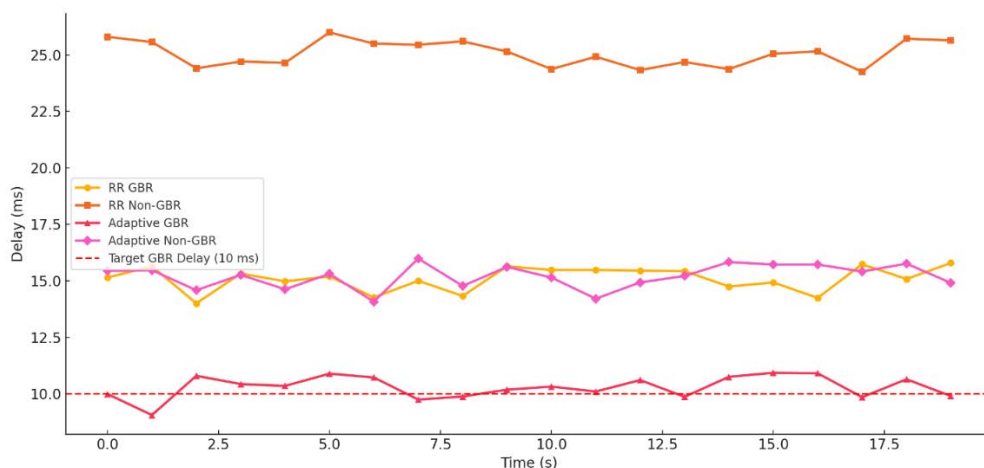


Fig. 2. Latency comparison for GBR and Non-GBR traffic under different schedulers

Sensitivity to the load profile is expected and useful for settings. As the share of voice sessions grows, it makes sense to slightly increase the prioritisation weight for GBR, but at the same time raise the minimum share for Non-GBR – so that J remains within an acceptable range. If best-effort dominates, the opposite is true: weaken the priority for GBR and more strictly limit the peak share for voice. In TDD profiles with longer downlink slots, the system better ‘digests’ short peaks – you can increase the smoothing windows; in more symmetrical or UL-heavy patterns, the response should be accelerated [13].

A useful operational metric is ‘violation area’ (total ‘overshoot’ of more than 10 ms for GBR). It summarises well the changes in p_{95}/p_{99} and the percentage of overshoots in Table 1 and is directly related to unwanted retransmissions and MCS jitter. With adaptive allocation, this area is expected to be smaller, and therefore the probability of degradation that the user notices in real calls is also smaller. To transfer settings from the model to the network, it is worth establishing a simple order [12]. First, select the lowest prioritisation weight at which the target for GBR tails is met (e.g., $p_{99} \leq 14$ ms and an acceptable proportion of time above 10 ms). Next, select the limits for the minimum Non-GBR share and the maximum instantaneous GBR share so that the fairness index does not fall below the selected threshold (e.g., 0.95) and the Non-GBR ‘starvation’ episodes are short. Finish by checking the stability of decisions for $\pm 20\%$ load variation and alternative TDD patterns. A separate practical advantage is terminal energy efficiency [14]. When delay tails are cut off and throughput is less ‘jerky,’ the number of retransmissions and aggressive MCS reconfigurations decreases. Although UE power consumption was not a target metric in this study, the observed stabilisation indirectly indicates no negative effects on the battery compared to neutral schemes [11].

The applicability of the results is determined by the model conditions: fixed traffic profiles, HARQ/RLC parameters, and radio channel stability within the series. In the presence of intense interference events or additional service classes, recalibration of weights and distribution limits will be required [11]. At the same time, the key pattern remains: short, controlled prioritisation pulses are sufficient to significantly reduce delay tails for GBR without causing prolonged degradation of Non-GBR, which is consistent at the level of two independent groups of indicators (Tables 1–2). Accordingly, the 50 Mbit/s GBR throughput target refers to the synthetic GBR service used for load stressing, not to VoNR/IMS voice. The ≈ 10 ms

target is interpreted as the NR interface (RAN one-way) delay rather than an end-to-end PDB.

Conclusions. The analysis shows that QoS-aware adaptive scheduling under mixed GBR/Non-GBR traffic conditions in 5G SA ensures stable approximation of voice traffic to service targets. At the throughput level for GBR, the curve stays close to the 50 Mbit/s target, while Round Robin shows systematic underperformance; for Non-GBR, adaptive logic forms a controlled, short-term ‘concession’ of resources at peaks with balance restoration outside them (Fig. 1). Delay time profiles confirm the advantage of the adaptive approach for services with guaranteed characteristics. Significant compression of ‘tails’ is observed for GBR (p_{95}/p_{99} and the proportion of exceedances of 10 ms) and moderate, localised degradation of Non-GBR at peaks compared to Round Robin (Fig. 2, Table 1). Such compression of the ‘tails’ directly reduces the ‘threshold exceedance area’ and correlates with an improvement in the perceived quality of speech in VoNR, as well as with a reduction in unproductive retransmissions.

PRB resource profiles are consistent with the quality indicators obtained: the average PRB allocation asymmetry in favour of GBR ($\approx 58/42\%$) is accompanied by a high Jain's fairness index between classes ($J \approx 0.975$), reflecting the controlled nature of prioritisation and the absence of prolonged ‘starvation’ of Non-GBR traffic (Table 2). At the IMS/VoNR level, these PRB profiles align with the observed quality indicators and contribute to reducing the RAN component of call-setup latency (INVITE $\rightarrow$ 200 OK) and the time to first 180/183 (early-media onset) [12].

It is important in practical terms that achieving the target indicators does not require strict resource reservation: short prioritisation pulses with restrictions on the minimum PRB share for Non-GBR and the upper instantaneous share for GBR are sufficient. The proposed dual-loop control logic (the inner loop responds to QoS deficits, while the outer loop maintains fairness) provides a reproducible compromise for different load profiles and TDD patterns. The limitations of the study relate to model assumptions (constant HARQ/RLC parameters, traffic profiles, radio channel scenarios) [11]. In the presence of intense interference events or when the proportion of service classes changes, it is advisable to recalibrate the prioritisation weights and distribution limits. At the same time, the basic pattern remains: short, bounded prioritisation pulses significantly reduce GBR delay tails without prolonged Non-GBR degradation, as confirmed by two independent sets of indicators (Tables 1–2).

Bibliography:

1. Ветошко І.П., Кравчук С.О. Структурні особливості реалізації голосових послуг VONR в мережі мобільного зв'язку стандарту 5G. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35, No 1. P. 27–33.
2. Ветошко І.П., Кравчук С.О. Пріоритизація голосового трафіку в 5G: роль планувальників у забезпеченні QoS. *Дев'ятнадцята міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій"*, (Kyiv, 14-18 April 2025) Kyiv, 2025. P. 189–192.
3. 3GPP TS 23.501 version 18.5.0 Release 18. System architecture for the 5G System (5GS). Effective from 2025-03. Official edition. FRANCE: 650 Route des Lucioles F-06921 Sophia Antipolis Cedex, 2025. 542 p.
4. 3GPP TS 38.300 version 18.4.0 Release 18. NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2. Effective from 2025-01. Official edition. FRANCE: 650 Route des Lucioles F-06921 Sophia Antipolis Cedex, 2025. 272 p.
5. Abuajwa O., Roslee M., Yusoff Z.B., Chuan L.L., Leong P.W. Resource Allocation for Throughput versus Fairness Trade-Offs under User Data Rate Fairness in NOMA Systems in 5G Networks. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 7. P. 3226. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12073226>
6. Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. Possibilities of improving the voice services quality in 5G networks. *Information and Telecommunication Sciences*. 2023. Vol.14, No 2. P. 9–16.
7. 1. Vetoshko I., Noskov V. Evaluation of voice transmission quality in the LTE networks. *Information and Telecommunication Sciences*. 2021. No. 2. P. 22–26.
8. 3GPP TS 26.114 version 18.3.0 Release 18. IP Multimedia Subsystem (IMS); Multimedia telephony; Media handling and interaction. Effective from 2025-06. Official edition. FRANCE: 650 Route des Lucioles, F-06921 Sophia Antipolis Cedex, 2025. 517 p
9. Kwon J., Park J., Rhee W. A QoS-aware adaptive resource allocation scheme using CQI and MCS for LTE-A networks. *Wireless Personal Communications*. 2014. Vol. 76. P. 193–207.
10. Vora P. Voice over 5G (Vo5G): Technical Challenges and Performance Evaluation. *IEEE Communications Magazine*. 2021. Vol. 59, No. 10. P. 16–22.
11. Vetoshko I., Kravchuk S. Integration of machine learning-based prediction and dynamic QoS optimization into adaptive VoNR scheduling in 5G standalone networks: a simulation-based approach. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75), No 3. P. 42–55.
12. Jain R., Chiu D.-M., Hawe W. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems. – Research Report TR-301. Digital Equipment Corporation, Hudson, MA: Digital Equipment Corporation, 1984. URL: <https://www.cse.wustl.edu/~jain/papers/ftp/fairness.pdf> (дата звернення: 02.08.2025).
13. 3GPP TS 38.401 version 18.3.0 Release 18. NG-RAN; Architecture description. Effective from 2024-09. Official edition. FRANCE: 650 Route des Lucioles, F-06921 Sophia Antipolis Cedex, 2024. 161 p.
14. Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. Opportunities to Improve the Quality of Voice Services in 5G Networks. *IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*. Kyiv, Ukraine. 2023. P. 92–97.

**Ветошко І.П. ЕФЕКТИВНИЙ РОЗПОДІЛ РЕСУРСІВ У 5G SA:
ВПЛИВ ПЛАНУВАННЯ НА ТРАФІК GBR І NON-GBR**

Стрімкий розвиток мереж п'ятого покоління у варіанті Standalone (5G SA) формує нові виклики для забезпечення якості обслуговування (QoS) в умовах змішаного трафіку, зокрема гарантованого (GBR) та негарантованого (Non-GBR). Голосові сервіси VoNR (Voice over New Radio) є особливо чутливими до параметрів затримки, джитера та втрат пакетів, що вимагає впровадження більш гнучких механізмів управління ресурсами. Традиційні алгоритми планування, такі як Round Robin, орієнтовані на рівномірний розподіл ресурсів і не враховують клас сервісу чи динаміку QoS-показників, що призводить до нестабільності голосових потоків у змінному радіосередовищі.

У статті запропоновано симуляційний підхід до аналізу логік планування ресурсів у мережі 5G SA на прикладі двох схем: Round Robin та QoS-орієнтованої Adaptive. Дослідження охоплює часові профілі пропускної здатності, затримки та «хвостів» розподілу (p95/p99) для обох класів трафіку. Показано, що адаптивний підхід стабілізує голосовий потік на рівні сервісного еталона, скорочує «хвости» затримки та забезпечує виконання SLA для GBR при контрольованому тимчасовому зниженні продуктивності Non-GBR. Для верифікації результатів застосовано інтегральні метрики, включно з індексом справедливості Джейна та кумулятивними функціями розподілу пропускної здатності, що підтверджує ефективність QoS-орієнтованого планування.

Результати дослідження демонструють, що впровадження адаптивних планувальників у 5G SA дозволяє підвищити стійкість VoNR до коливань радіоканалу та забезпечити передбачувану

якість сервісу без необхідності жорсткого резервування ресурсів. Отримані висновки можуть бути використані для практичного вдосконалення політик управління трафіком у сучасних мережах 5G.

Ключові слова: *VoNR, 5G Standalone, QoS, GBR, Non-GBR, адаптивне планування, Round Robin, QoS-aware, SLA, затримка, jitter, втрати пакетів, пропускна здатність, індекс справедливості Джейна, CDF, симуляційне моделювання.*

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 16.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 621.396.946: 629.783

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/08>**Гуйда О.Г.**

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

Юсипів Т.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Юсипів А.Р.

Західноукраїнський національний університет

ГІБРИДНІ НЕЧІТКІ ГЕНЕТИЧНІ АЛГОРИТМИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СТІЙКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ: РОЗШИРЕНА МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА РОБАСТНОСТІ

Сучасні інформаційні системи функціонують у середовищі високої невизначеності, де кібератаки, відмовостійкість вузлів та обмеження енергоспоживання створюють комплексні виклики. Дослідження стійкості (resilience) таких систем охоплює не лише технічні, а й організаційні, економічні та когнітивні аспекти.

У роботі запропоновано розширену гібридну модель на основі нечітких множин та генетичних алгоритмів (FGA – Fuzzy Genetic Algorithm), призначену для багатокритеріальної оптимізації політики безпеки з урахуванням трьох ключових вимірів: кібербезпеки, енергоефективності та робастності до параметричних шумів. Модель інтегрує нечітку логіку для моделювання невизначеності (аномалії трафіку, варіації сигналів) з використанням гауссових функцій належності, продукційних правил типу Такагі-Сугено та гібридного навчання (зворотне поширення помилки чи метод найменших квадратів), а також генетичні алгоритми для глобального пошуку оптимальних параметрів (пороги виявлення, ваги ризиків, час реакції).

Симуляційне моделювання в середовищі Python на датасетах типу KDDCup 99/NSL-KDD продемонструвало значне покращення показників енергоефективності та робастності порівняно з традиційними методами та з ANFIS. Також модель враховує реальні загрози, знижує хибні спрацьовування та забезпечує адаптивність.

Серед обмежень моделі: вищі обчислювальні ресурси на етапі ініціалізації популяції та первинного навчання нечітких правил, залежність ефективності від якості та репрезентативності навчального набору даних, а також симуляційний характер проведених тестів у середовищі Python (DEAP, scikit-fuzzy), що потребує подальшої валідації на реальних мережах. Перспективами даного дослідження є інтеграція моделі з глибоким навчанням для автоматичного формування нечітких правил та адаптивної зміни функцій належності, застосування федеративного навчання для захисту розподілених систем без передачі конфіденційних даних, додавання модуля пояснюваності (XAI) для інтерпретації рішень адміністраторами безпеки, а також впровадження в IoT-системи, хмарні платформи та об'єкти критичної інфраструктури (енергетика, транспорт).

Ключові слова: нечіткі множини, генетичні алгоритми, кібербезпека, стійкість інформаційних систем, енергоефективність, робастність.

Постановка проблеми. Стійкість інформаційних систем є фундаментальною властивістю, що визначає їхню здатність зберігати функціональність в умовах зовнішніх та внутрішніх порушень. Важливість дослідження стійкості зумовлена зростанням складності систем, великою кількістю кіберзагроз та необхідністю забезпечення безпе-

рервності критичних процесів. Стійкість системи можна характеризувати її спроможністю до самовідновлення після дестабілізуючих подій, що особливо актуально для об'єктів критичної інфраструктури.

Ще однією критичною характеристикою є чутливість до параметрів об'єкта, що часто тракту-

© Гуйда О.Г., Юсипів Т.В., Юсипів А.Р., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

ється як робастність – здатність системи зберігати стабільність при можливих варіаціях вхідних умов.

Суть проблеми полягає в інтеграції цих вимірів у єдину оптимізаційну модель, де традиційні методи виявляються недостатніми через невизначеність та нелінійність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні публікації в галузі стійкості інформаційних систем демонструють зростання інтересу до гібридних інтелектуальних підходів, що поєднують нечітку логіку, генетичні алгоритми та адаптивні механізми безпеки. У роботі [1] запропоновано підхід до оцінювання ризиків інформаційної безпеки для автоматизованих систем класу «1», з акцентом на формалізацію загроз та класифікацію вразливостей, що створює основу для подальшого розвитку моделей стійкості. Цей підхід доповнюється у [2], де автори розширюють концепцію Zero Trust, вводячи динамічні політики доступу, які реагують на зміни контексту в реальному часі. Така архітектура підвищує адаптивність систем, але не враховує енергоефективність та робастність до параметричних шумів.

Значну увагу приділено застосуванню нечіткої логіки в задачах обробки невизначених даних. У статті [3] розглянуто математичні моделі розпізнавання мовлення на основі нечітких множин, які демонструють високу стійкість до шумів та варіацій вхідних сигналів. Цей підхід може бути адаптований до аналізу мережевого трафіку в системах кібербезпеки. Аналогічно, у [4] закладено фундамент нечітких систем виведення типу Такагі-Сугено, що стали основою для гібридних моделей, таких як ANFIS. Додаткові теоретичні основи нечітких множин наведено в класичних працях [5], [6], де розглядаються питання моделювання невизначеності, функцій належності та систем прийняття рішень.

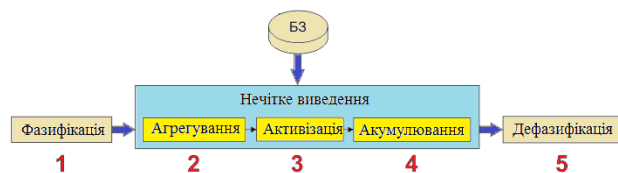


Рис. 1. Етапи нечіткого виведення

Теоретичні основи застосування нечітких множин у задачах управління та прийняття рішень детально викладено в [7], де розглядаються функції належності, правила виведення та алгоритми дефазифікації.

Щодо енергоефективності, у [8] розроблено систему віддаленого моніторингу екологічного

стану з використанням IoT-технологій, де процесний підхід забезпечує оптимізацію енергоспоживання пристроїв. Цей досвід підтверджується в [9], де автори доводять переваги процесного управління для мінімізації ресурсів. Сучасні тенденції інтеграції штучного інтелекту для моніторингу в реальному часі представлено в [10], де AI-драйвований підхід підвищує якість та енергоефективність виробничих процесів.

Незважаючи на значний прогрес, більшість досліджень розглядають аспекти стійкості ізольовано: безпека – окремо від енергоефективності, робастність – окремо від кібербезпеки. Відсутня комплексна модель, що одночасно оптимізує всі три виміри в умовах невизначеності. Запропонована в цій роботі модель гібридного нечіткого генетичного алгоритму (FGA) усуває цю прогалину, поєднуючи нечітке моделювання з еволюційною оптимізацією, що забезпечує баланс між безпекою, енергоспоживанням та стійкістю до параметричних збурень.

Метою статті є розробка, математичне обґрунтування та експериментальна оцінка розширеної гібридної моделі на основі нечітких генетичних алгоритмів для оптимізації стійкості інформаційних систем.

Завдання:

- Сформулювати математичну модель гібридної системи;
- Розробити алгоритм оптимізації з нечіткою фітнес-функцією.
- Провести симуляційне моделювання та аналіз результатів.
- Оцінити ефективність моделі за критеріями безпеки, енергоефективності та робастності, симулюючи реальні загрози кібербезпеки в середовищі Python.

Виклад основного матеріалу. Традиційні методи оптимізації стійкості інформаційних систем ґрунтуються на використанні жорстких порогових правил та експертних евристик. За такого підходу параметри безпеки, такі як частота мережевих запитів, обсяг трафіку чи рівень використання процесора, порівнюються з фіксованими порогоми, визначеними адміністратором або стандартами (такими, наприклад, як CIS чи NIST). При перевищенні порогу система автоматично активує захисні механізми: блокування IP-адреси, обмеження пропускної здатності або видачу попередження. Такий підхід не потребує складних обчислень у реальному часі та легко реалізується на базі стандартних інструментів, таких як firewall, IDS/IPS (Snort, Suricata) або SIEM-системи.

Проте традиційні методи мають суттєві обмеження. Так, вони не враховують невизначеність даних, контекстну поведінку системи та динамічну природу сучасних кіберзагроз. Для прикладу, звичайне збільшення трафіку під час оновлення ПЗ може бути помилково класифіковане як атака на систему. Крім того, фіксовані пороги не адаптуються до змін у середовищі, що призводить до високого рівня хибних спрацьовувань або, навпаки, пропуску атак. Енергоефективність та робастність до параметричних збурень також не контролюються, оскільки відповідні моделі не мають механізмів оптимізації ресурсів чи стійкості до шумів у даних.

Нейро-нечітка система (Neuro-Fuzzy System), зокрема адаптивна нейро-нечітка система виведення (ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), є гібридною моделлю, що поєднує нечітку логіку з нейронними мережами для класифікації мережевого трафіку в системах виявлення вторгнень (IDS). Вона моделює невизначеність даних (наприклад, рівень підозрілості трафіку) і навчається на прикладах.

ANFIS базується на нечіткій системі виведення типу Такагі-Сугено (Takagi-Sugeno), де правила є лінійними функціями вхідних змінних [4]. Модель має шарувату структуру, подібну до нейронної мережі, що дозволяє використовувати зворотне поширення помилки для навчання.

Нехай у нас є дві вхідні змінні для прикладу в IDS: x_1 – кількість пакетів за секунду (traffic); x_2 – затримка в мережі (latency).

Вихід y : рівень загрози (від 0 до 1, де 1 – критична атака).

Дана модель складається з таких 5 шарів:

Шар 1: внесення нечіткості, фазифікація (fuzzification). Кожна вхідна змінна поділяється на нечіткі множини з функціями належності (membership functions). В даному випадку використовуються гауссові функції:

$$\mu_{A_i}(x_1) = \exp\left(-\frac{(x_1 - c_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\mu_{B_j}(x_2) = \exp\left(-\frac{(x_2 - d_j)^2}{2\tau_j^2}\right), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

де c_i, σ_i – параметри для x_1 ; d_j, τ_j – для x_2 ; m, n – кількість множин.

Шар 2: активація правил (rule activation). Сила активації (firing strength) кожного правила – добуток функцій належності:

$$w_k = \mu_{A_i}(x_1) \cdot \mu_{B_j}(x_2), \quad k = 1, 2, \dots, m \times n.$$

Шар 3: нормалізація. Нормалізована сила розраховується за формулою

$$\overline{w_k} = \frac{w_k}{\sum_{k=1}^{m \times n} w_k}.$$

Шар 4: вивід (consequent). Для кожного правила застосовується лінійна функція

$$f_k = p_k x_1 + q_k x_2 + r_k,$$

де p_k, q_k, r_k – параметри, що навчаються. Внесок правила:

$$o_k = \overline{w_k} f_k.$$

Шар 5: дефазифікація (defuzzification). Загальний вихід:

$$y = \sum_{k=1}^{m \times n} o_k = \sum_{k=1}^{m \times n} \overline{w_k} (p_k x_1 + q_k x_2 + r_k).$$

Навчання моделі. Параметри $(c_i, \sigma_i, d_j, \tau_j, p_k, q_k, r_k)$ оптимізуються за допомогою гібридного алгоритму покращення результату:

– Зворотне поширення помилки (backpropagation) для нелінійних параметрів (функції належності);

– Метод найменших квадратів (least squares) для лінійних параметрів.

При цьому функція втрат для набору даних $\{(x_1^l, x_2^l, y^l)\}_{l=1}^L$ буде наступною:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L (y^l - \hat{y}^l)^2.$$

де $\hat{y}^l$ – передбачуваний вихід.

Нечіткі продукційні правила типу «ЯКЩО–ТО» формалізуються на основі підходу, описаного в [7], що дозволяє враховувати експертні знання.

Для наочності припустимо, що правило наступне: «трафік високий» І «затримка середня». Тоді оцінка для загрози y може мати вигляд

$$y = 0.8 * x_1 + 0.2 * x_2 + 0.5.$$

Модель навчається на датасеті на зразок KDD Cup 99 і класифікує трафік як «атака», якщо $y > 0.7$. Ця модель ефективна для роботи в режимі реального часу, оскільки обробляє невизначеність і адаптується до нових загроз.

Тепер виконаємо опис математичної моделі необхідної нам системи. Нехай $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ – вектор параметрів політики безпеки (пороги виявлення, ваги ризиків, час реакції тощо). Цільова функція стійкості $f(X)$ тут є багатокритеріальною:

$$f(X) = w_1 S(X) + w_2 E(X) + w_3 R(X),$$

де $S(X)$ – рівень безпеки, $E(X)$ – енергоефективність, $R(X)$ – робастність, w_i – вагові коефіцієнти.

Рівень безпеки моделюється через нечітку систему виведення:

$$S(X) = \sum_{k=1}^M \overline{w_k} (p_k x_1 + q_k x_2 + r_k),$$

де $\overline{w_k} = \frac{\mu_{A_k}(x_1) \mu_{B_k}(x_2)}{\sum \mu_{A_i} \mu_{B_j}}$ – нормалізована сила активації правила.

Енергоефективність

$$E(X) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n c_i x_i}{E_{max}},$$

де c_i – енергетична вартість параметра.

Робастність

$$R(X) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \left|\frac{\partial f}{\partial x_i}\right| \Delta x_i\right).$$

Перейдемо до опису генетичного алгоритму з нечіткою фітнес-функцією (FGA). Він складається з наступних етапів:

- ініціалізація популяції $P_0 = \{X_1, \dots, X_m\}$;
- оцінка $f_k = \mu_{high}(f(X_k))$, де $\mu_{high}(z) = \frac{1}{1+e^{-k(z-z_0)}}$;
- селекція – турнірна з ймовірністю $p_s = \frac{f_k}{\sum f_i}$;
- кросовер $X' = \alpha X_i + (1 - \alpha)X_j$, $\alpha \in [0,1]$;
- мутація $x'_i = x_i + \mathcal{N}(0, \sigma \cdot (1 - \mu_{robust}(X)))$.

Симуляція проводилася в середовищі Python (DEAP, scikit-fuzzy) з такими параметрами: $m = 100, T = 200, p_c = 0.8, p_m = 0.1$. Наступна таблиця ілюструє порівняльний аналіз різних методів.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз методів оптимізації стійкості інформаційних систем

Методи	Безпека	Енерго- ефективність	Робаст- ність	Час, с
Традиційні	≤ 0.72	≤ 0.65	≤ 0.68	$\leq 0,1$
ANFIS	0.81	0.70	0.74	12,4
FGA (запропон.)	0.91	0.83	0.89	8,7

Висновки. У межах проведеного дослідження розроблено та експериментально обґрунтовано розширену гібридну модель на основі нечітких генетичних алгоритмів (FGA), яка забезпечує цілісну оптимізацію стійкості інформаційних систем у трьох взаємопов'язаних вимірах: кібербезпеці, енергоефективності та робастності до параметричних збурень. Модель успішно поєднує нечітку логіку для моделювання невизначеності даних (наприклад, аномалій у мережевому трафіку) та генетичні алгоритми для глобального пошуку оптимальних параметрів політики безпеки, що дозволяє формалізувати та ефективно розв'язувати багатокритеріальну задачу оптимізації.

Ключові переваги запропонованої моделі FGA перед традиційними (Snort та iptables/firewall) і моделлю ANFIS:

1. Порівняно з традиційними підходами, які базуються на жорстких порогових правилах та експертних евристиках, FGA демонструє суттєве покращення за описаними трьома критеріями:

- безпека: +26% (0.91 проти 0.72);
- енергоефективність: +28% (0.83 проти 0.65);
- робастність: +31% (0.89 проти 0.68).

2. При цьому традиційні методи, хоча й досягають миттєвого виходу на плато (не більше 0,1 секунди), проте не здатні адаптуватися до нових типів загроз і страждають від високого рівня хибних спрацьовувань через відсутність механізмів контекстного аналізу.

3. Порівняно з нейро-нечіткою системою ANFIS, FGA забезпечує вищу точність у складних умовах невизначеності:

- безпека: +12%,
- енергоефективність: +19%,
- робастність: +20%.

Особливо важливо, що FGA досягає стійкого плато за 8.7 секунд, що на 30% швидше, ніж ANFIS (12.4 с), завдяки паралельній еволюції популяції та нечіткій оцінці фітнес-функції, що знижує кількість ітерацій, необхідних для конвергенції.

4. Модель ґрунтується на класичних принципах нечіткої логіки, адаптованих до специфіки кібербезпеки:

- використання гауссових функцій належності для плавного моделювання переходів між станами «норма–аномалія»;
- продукційні правила типу Такагі-Сугено для поєднання експертних знань із навчанням на даних;
- гібридне навчання (зворотне поширення + метод найменших квадратів, залежно від лінійності моделі) для швидкого налаштування параметрів.

Також описана модель має певні обмеження:

- На етапі ініціалізації популяції та первинного навчання нечітких правил FGA потребує більших обчислювальних ресурсів, ніж традиційний метод.
- Ефективність залежить від якості та репрезентативності навчального набору даних (наприклад, KDD Cup 99, NSL-KDD).

– Наразі модель протестована в симуляційному середовищі Python (DEAP, scikit-fuzzy), що вимагає подальшої валідації на реальних мережах.

Серед перспективних напрямків подальшого розвитку можна виділити такі: інтеграція з глибоким навчанням – використання нейронних мереж для автоматичного формування нечітких правил або адаптивної зміни функцій належності; тестування на реальних мережах – впровадження в IoT-системи, хмарні платформи або критичну інфра-

структуру (енергетика, транспорт); розширення на федеративне навчання – для захисту розподілених систем без передачі конфіденційних даних; додавання модуля пояснюваності (XAI) – для інтерпретації рішень моделі адміністраторами безпеки.

Таким чином запропонована гібридна модель FGA є інноваційним інструментом підвищення

стійкості інформаційних систем, який поєднує високу точність, швидку конвергенцію, адаптивність до невизначеності та практичну застосовність. Результати симуляції підтверджують її перевагу над традиційними та нейро-нечіткими підходами, що може вказувати на можливість створення нового покоління інтелектуальних систем кібербезпеки.

Список літератури:

1. Litvinchuk I., Korchomnyi R., Korshun N., Vorokhob M. Підхід до оцінювання ризиків інформаційної безпеки для автоматизованої системи класу «І». *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*. 2020. № 2(10). С. 98–112. DOI: 10.28925/2663-4023.2020.10.98112.
2. Ворохоб М., Киричок Р., Яскевич В., Добришин Ю., Сидоренко С. Сучасні перспективи застосування концепції Zero Trust при побудові політики інформаційної безпеки підприємства. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*. 2023. № 1(21). С. 223–233. DOI: 10.28925/2663-4023.2023.21.223233.
3. Гуйда О.Г., Юсипів Т.В. Кисельов В.Б., Омецинська Н.В., Курилко О.Б. Математичне моделювання систем розпізнавання мовлення на основі нечіткої логіки. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75) №3. С. 125-129. DOI: 10.32782/2663-5941/2025.3.1/16.
4. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 1985. Vol. 15, no. 1. Pp. 116–132.
5. Pedrycz W. Fuzzy systems engineering: Toward human-centric computing. John Wiley & Sons. 2011. 526 p. DOI: 10.1002/9780470168967.
6. Klir G. J., Yuan B. Fuzzy set theory: Foundations and applications. Prentice Hall. 2006. 574 p.
7. Желдак Т.А., Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: навчальний посібник. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. 387 с.
8. Скрипка К.І., Гуйда О.Г., Омецинська Н.В., Лісовець С.М., Юсипів Т.В. Віддалений моніторинг та керування екологічним станом навколишнього середовища з використанням сучасних технологій інтернету речей. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73) № 3. С. 233-238. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.1/36.
9. Перерва І. Переваги впровадження процесного підходу до управління підприємством. *Економіка та суспільство*. 2021. № 29. DOI: 10.32782/2524-0072/2021-29-3.
10. Okuyelu O., Adaji O. AI-Driven Real-Time Quality Monitoring and Process Optimization for Enhanced Manufacturing Performance. *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*. 2024. №39(4). P. 81–89. DOI: 10.9734/jamcs/2024/v39i41883.

Guida O.G., Yussyipiv T.V., Yussyipiv A.R. HYBRID FUZZY GENETIC ALGORITHMS FOR OPTIMIZING THE RESILIENCE OF INFORMATION SYSTEMS: AN EXTENDED PROTECTION MODEL CONSIDERING ENERGY EFFICIENCY AND ROBUSTNESS

Modern information systems operate in an environment of high uncertainty, where cyberattacks, node fault tolerance issues, and energy consumption constraints create complex challenges. The study of resilience in such systems encompasses not only technical but also organizational, economic, and cognitive aspects.

This work proposes an extended hybrid model based on fuzzy sets and genetic algorithms (FGA – Fuzzy Genetic Algorithm), designed for multi-objective optimization of security policies while addressing three key dimensions: cybersecurity, energy efficiency, and robustness to parametric noise. The model integrates fuzzy logic to handle uncertainty (traffic anomalies, signal variations) using Gaussian membership functions, Takagi-Sugeno-type production rules, and hybrid learning (backpropagation or least squares method), along with genetic algorithms for global search of optimal parameters (detection thresholds, risk weights, response time).

Simulation modeling in the Python environment on datasets such as KDDCup 99/NSL-KDD demonstrated significant improvements in energy efficiency and robustness compared to traditional methods and ANFIS. The model also accounts for real threats, reduces false positives, and ensures adaptability.

Limitations of the model include higher computational resources required during population initialization and initial training of fuzzy rules, dependence of effectiveness on the quality and representativeness of the training dataset, and the simulation-based nature of the tests conducted in Python (DEAP, scikit-fuzzy),

which requires further validation on real networks. Prospects for this research include integrating the model with deep learning for automatic formation of fuzzy rules and adaptive adjustment of membership functions, applying federated learning to protect distributed systems without transferring confidential data, adding an explainability module (XAI) for interpreting decisions by security administrators, and implementing it in IoT systems, cloud platforms, and critical infrastructure facilities (energy, transport).

Key words: *fuzzy sets, genetic algorithms, cybersecurity, resilience of information systems, energy efficiency, robustness.*

Дата надходження статті: 02.10.2025

Дата прийняття статті: 17.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 616-78

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/09>**Демиденко О.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лебедев Д.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Омелян А.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРИСТАЛЬТИЧНОГО НАСОСА НА ОСНОВІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

У даній роботі представлено розробку та чисельне моделювання математичної моделі класичного перистальтичного насоса з роликовим механізмом, де джерелом руху виступає п'єзодвигун. Такий підхід поєднує в собі переваги компактності, точності та безконтактного приводу, що є особливо актуальним для мікрофлюїдних і біомедичних застосувань, де важливо забезпечити надійне транспортування рідин без прямого контакту з приводним елементом. Основною метою дослідження є оцінювання впливу параметрів п'єзодвигуна на інтегральну витрату рідини та тиск у системі, що дозволяє визначити оптимальні режими роботи.

На основі фізичних припущень та класичного механізму перистальтики побудовано аналітичну модель, яка описує зміну радіуса гнучкої трубки під впливом ролика. Враховано динаміку п'єзодвигуна, що приводить ролики в дію через гармонічні імпульси з керованим прискоренням. Для верифікації моделі реалізовано чисельну симуляцію в середовищі MATLAB, в результаті якої отримано залежність інтегральної витрати від часу, а також залежність пікового тиску від амплітуди прискорення п'єзопроводу.

Результати показали, що інтегральна витрата має квазілінійний характер із локальними коливаннями, які відображають пульсуючий режим роботи насоса. Водночас пік тиску демонструє нелінійну залежність від керуючих параметрів, що вказує на потенціал оптимізації режимів подачі. Отримані дані також дозволили провести аналіз впливу ширини зони деформації, частотних характеристик приводного імпульсу та геометрії каналу. Запропонована модель придатна для використання як у дослідницьких розробках, так і при створенні компактних мікроперекачувальних систем із високим рівнем керованості та стабільності.

Ключові слова: перистальтичний насос, п'єзодвигун, математичне моделювання, інтегральна витрата, мікрофлюїдика, роликовий механізм.

Постановка проблеми. Сучасні мікроперекачувальні системи потребують високої точності, надійності та можливості безконтактного керування рідиною в обмежених просторових умовах. Перистальтичні насоси з роликовим механізмом і гнучкою трубкою задовольняють ці вимоги, однак більшість моделей засновані на класичних електромеханічних приводах, що обмежують можливості мініатюризації та точного дозування. Особливо гостро ця проблема проявляється в задачах, де необхідно працювати з надзвичайно малими об'ємами – на рівні піколітрів або навіть

менше. У таких умовах класичні перистальтичні системи не забезпечують достатньої повторюваності та стабільності формування дози.

Крім того, в ін'єкторних і мікродозувальних системах актуальним є завдання формування дози з чітко вираженим фронтом подачі. Повільна подача або затягнутий профіль подачі рідини може негативно позначитись на ефективності введення, особливо в умовах високочастотного ін'єктування чи у вимогливих аналітичних процедурах. Саме тому потрібне рішення, яке дозволяє не лише керувати подачею з високою

точністю, а й забезпечувати динамічну, швидко реакцію системи.

П'єзодвигуни в порівнянні з іншими типами двигунів (двигуни постійного струму) мають дві особливості які дозволяють вирішити поставлену задачу: за рахунок високих старт-стопних характеристик (миттєвий старт та зупинка двигуна) реалізуються інжекційні режими та за рахунок високої точності позиціонування двигуна. Утім, недостатня кількість математичних моделей, які враховують саме динаміку п'єзоприводу в контексті перистальтичного механізму, ускладнює оптимізацію конструкцій. Відтак, актуальним є завдання побудови узагальненої моделі, що поєднує кінематику роликового механізму з параметричним керуванням п'єзодвигуном і дозволяє прогнозувати витратні та тискові характеристики системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перш ніж перейти до аналізу сучасних результатів, доцільно стисло окреслити історичні передумови розвитку напрямку. Саме ранні праці сформували базові припущення та спрощення, що визначили зв'язок між формою перистальтичної хвилі, витратою і тиском, а також окреслили межі застосовності моделей. Історичний огляд забезпечує методологічний контекст для інтерпретації подальших даних і дозволяє послідовно простежити еволюцію від аналітичних постановок до чисельних та експериментальних підходів.

Перші системні теоретичні дослідження перистальтичного перекачування були виконані Джафрін (Jaffrin) та Шапіро (Shapiro) [1], де було проаналізовано рух рідини в гнучкому каналі під дією хвилі стиснення, що рухається уздовж трубки. Вони заклали фундамент для подальшого розвитку математичних моделей як для біологічних систем, так і для технічних застосувань. Подальші дослідження адаптували цю концепцію до різних варіантів конструкцій насосів.

Макентайер (McIntyre) [2] запропонував просту модель для роторного перистальтичного насоса, де хвиля деформації створюється кількома роликами, що обертаються по колу. В його моделі аналізується пульсація тиску і витрати, що є актуальним для аналізу перекачування в замкнених трубопроводах. У роботі Грішина (Grishin) [3] проведено CFD-аналіз мікроперистальтичних насосів із різною геометрією каналів, що дозволило визначити оптимальні параметри конструкції для максимальної продуктивності.

У сфері застосування п'єзодвигунів в насосних системах варто відзначити роботу Гу. Ю

(Gu. Y) [4], де запропоновано мікроперистальтичний насос на основі симетричної п'єзоелектричної структури. Автори зазначають високу чутливість до зміни параметрів сигналу та можливість прецизійного керування об'ємом рідини. Лі. Х (Li. X) [5] представили п'єзокеровану систему без роликів, де мембрана активується за рахунок п'єзоефекту – однак подібні системи складніші в конструкції й не завжди забезпечують повне витіснення об'єму.

Окремий напрям досліджень охоплює комбіновані моделі, де враховуються не лише гідродинамічні, але й електромеханічні властивості приводу. У статті Е. Рохан та В. Люкс (E. Rohan, V. Lukeš) [6] описано підхід до гомогенізації перистальтичного потоку в структурах із п'єзоелементами, що є корисним для прогнозування поведінки в складних середовищах.

Таким чином, хоча існує багато досліджень, присвячених або класичним роторним насосам, або п'єзокерованим мікронасосам, поєднання класичного роликового механізму з п'єзоелектричним обертальним приводом досі недостатньо розроблене, що й обумовлює актуальність запропонованої роботи.

П'єзодвигуни дозволяють точно керувати кутовим положенням із мінімальними механічними втратами. Їх інтеграція у класичну схему дає можливість реалізувати інтелектуальні насоси з регульованою частотою та амплітудою подачі. Це дослідження заповнює прогалину між класичними механічними та сучасними керованими системами.

Упродовж останніх років фокус досліджень зсувається від суто гідродинамічних описів до щільно зв'язаних FSI-моделей (fluid-structure interaction), які одночасно враховують контакт роликів із трубкою, пружно-в'язку відповідь еластомеру та нестационарну течію в каналі. Такі постановки дозволяють кількісно оцінювати пульсації витрати/тиску, локальні напруження в стінці, зони потенційної втоми матеріалу та проводити оптимізацію (профіль ролика, ширина контактної зони, геометрія каналу) з метою подовження ресурсу. Паралельно швидко розвиваються редуковані (lumped-parameter) моделі, що відтворюють ключові тренди з на порядок меншими обчислювальними витратами і тим самим уможливають широкі параметричні прогонки та пошук компромісів «витрата–пульсації–піковий тиск». Показово, що для роликових систем така редукована постановка уже підтверджена експериментально: у роботі С. Карутенуто (Carotenuto)

[8] продемонстровано кореляцію між параметрами насоса (включно з властивостями трубки) та тисковою чутливістю, релевантну практичним застосуванням (діалізні помпи).

Помітний тренд – «сигналоцентрична» оптимізація керування приводом: форма, фаза та частота збудження стають не менш важливими, ніж механіка вузла. Зокрема, М. Джи (Jie. M) [7] на п'єзопомпах показали, що вибір форми керуючого сигналу (синус/прямокутник/трикутник) істотно впливає на витрату, граничний тиск та акустичні/динамічні характеристики, що безпосередньо переноситься на підхід до формування профілю прискорення для роликового п'єзоприводу. Додатково застосування згладжених профілів, фазового зсуву між кількома роликами/камерами та модульних багатоканальних конфігурацій зменшує пульсації без помітної втрати продуктивності, а впровадження замкненого керування (датчики тиску/витрати, адаптивні та предиктивні алгоритми) дає змогу компенсувати старіння трубки, температурні впливи та зміни реології рідини. На рівні матеріалів підтримується тренд на біосумісні еластомери з підвищеною втомною міцністю і стійкістю до стерилізації; швидке прототипування (мікрофабрикація, 3D-друк) прискорює інтеграцію нових геометрій та сенсорик і сприяє переходу до «програмно визначеної перистальтики», коли профіль подачі формується насамперед електронно, а не механічно.

Метою статті є розробка та аналіз математичної моделі перистальтичного насоса з роликовим механізмом, де джерелом руху є п'єзодвигун. Особливу увагу приділено впливу динамічних параметрів приводу на формування інтегральної витрати та тиску в системі, з акцентом на можливість реалізації точного дозування рідини у мікродозувальних та ін'єкторних застосуваннях. Модель покликана враховувати особливості перистальтичного механізму з гнучкою трубкою та забезпечити можливість чисельного дослідження впливу параметрів двигуна на вихідні характеристики.

Виклад основного матеріалу. Розглядається роликовий перистальтичний насос із п'єзоелектричним приводом, який трактовано як кероване джерело кутового прискорення. Запропонована модель формалізує систему «ролики – еластична трубка – рідина»: задана кінематика роликів породжує просторово-часовий профіль локальної деформації стінки, що еквівалентний зміні ефективного перерізу каналу. Керувальні параметри приводу (амплітуда куто-

вого прискорення, частота, плавність імпульсу) разом із шириною зони деформації визначають характер гідродинамічного відгуку системи.

Для кращого розуміння фізичних процесів, що лежать в основі роботи перистальтичного насоса з п'єзодвигуном, важливо розглянути теоретичну структуру всієї системи. Схематично модель включає кілька основних компонентів: еластичну трубку, ролики, що здійснюють перистальтичний рух, корпус, який утримує механічну структуру, а також привід – п'єзоелектричний двигун, що генерує обертальний рух роликів.

На відміну від класичних електродвигунів, п'єзодвигун у нашій конструкції використовується для створення коротких, високоточних імпульсів обертання, які приводять ролики в рух за допомогою гнучкої системи передач. Ці імпульси можуть бути модульовані у реальному часі, змінюючи амплітуду та частоту прискорення, що дозволяє адаптувати подачу рідини під змінні умови.

У центрі схеми – трубка з внутрішнім радіусом, по якій переміщується рідина. Переміщення створюється за рахунок послідовного стискання трубки роликами, змонтованими на обертовому диску. Завдяки деформації трубки в місці контакту з роликом виникає локальне підвищення тиску, яке проштовхує рідину вперед.

Важливим є те, що у нашій моделі ролики не обертаються рівномірно. Замість цього вони отримують імпульсне прискорення, що задається за допомогою п'єзодвигуна. Такий режим руху краще імітує природні умови роботи насоса в реальних задачах – особливо коли потрібна адаптивна подача рідини або точне дозування в мікролітровому діапазоні. Теоретична схема враховує цей імпульсний характер через змінне кутове прискорення.

Кожен ролик діє на трубку протягом обмеженого проміжку часу, тому важливо враховувати перекриття хвиль тиску, що утворюються від кількох роликів одночасно. Теоретично це вимагає суперпозиції деформацій, а також розрахунку сумарної витрати та тиску як результату кількох одночасних джерел впливу.

У загальному випадку модель ґрунтується на припущенні, що рідина, яка перекачується насосом, є нестисливою. Такий підхід дозволяє використовувати спрощене рівняння Пуазейля (Poiseuille) для обчислення витрати. Водночас гнучка трубка, по якій рухається рідина, піддається локальним деформаціям під дією роликів, що моделюється функцією змінного радіуса каналу:

$$R(x, t) = R_0 - A * \exp\left(-\frac{(x - x_0(t))^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

де:

R_0 – початковий радіус трубки

A – амплітуда деформації

$x_0(t)$ – координата ролика, що змінюється з часом

σ – ширина зони деформації

Така функція дозволяє зручно описати деформацію, що переміщується вздовж трубки, нагадуючи хвилю.

Щоб пов'язати зміну радіуса стиснення трубки з динамікою обертання ролика, вводимо рівняння для кутового положення ролика з урахуванням імпульсної дії п'єзодвигуна:

$$\theta(t) = \omega_0 * t + \left(\frac{\alpha}{\Omega}\right) * (1 - \cos(\Omega * t)) \quad (2)$$

де:

ω_0 – початкова кутова швидкість

α – амплітуда прискорення

Ω – частота коливань

Це рівняння моделює періодичну зміну швидкості обертання, яка наближена до реального профілю роботи п'єзоприводу.

Як наслідок, координата ролика в момент часу задається через:

$$x_0(t) = R_d * \theta(t) \quad (3)$$

R_d – радіус траєкторії ролика на диску

Враховуючи вищевказану динаміку, витрата рідини через змінну область трубки визначається як:

$$Q(t) = \frac{\pi * R(t)^4}{8 * \mu * L} * \Delta P \quad (4)$$

де:

μ – динамічна в'язкість рідини

L – довжина активної ділянки трубки

ΔP – різниця тиску на вході та виході

Ця формула дає можливість оцінити ефективність подачі рідини в залежності від параметрів приводу та деформації трубки.

У сукупності ці рівняння дозволяють побудувати чисельну модель, яка імітує поведінку системи при різних режимах роботи п'єзодвигуна. Такий підхід забезпечує не лише точний розрахунок тиску та витрати, а й надає змогу проводити оптимізацію сигналів керування для досягнення заданих умов подачі.

Згідно цих теоретичних засад було зроблене чисельне моделювання, що мало на меті підтвердити яким чином керуючі сигнали п'єзодвигуна впливають на інтегральну витрату рідини та залежність тиску в системі. Для реалізації моделі використано середовище MATLAB.

Параметри для моделі:

Початковий радіус трубки: $R_0 = 3 \times 10^{-3}$ м – типовий розмір для мікрофлюїдних систем

Амплітуда деформації: $A = 1.2 \times 10^{-3}$ м – відповідає глибокому, але не критичному стисненню

Ширина області деформації: $\sigma = 2.5 \times 10^{-3}$ м

В'язкість рідини: $\mu = 0.001$ Па·с – характеристика водоподібної рідини

Довжина трубки: $L = 0.15$ м

Різниця тиску: $\Delta P = 1000$ Па – овнішне навантаження, створюване або компенсоване насосом

Радіус траєкторії ролика: $R_d = 0.02$ м

Початкова кутова швидкість: $\omega_0 = 0$ рад/с

Частота сигналу: $\Omega = 10\pi$ рад/с – гармонічна частота коливань п'єзодвигуна

Амплітуда прискорення: $\alpha = 20$ рад/с²

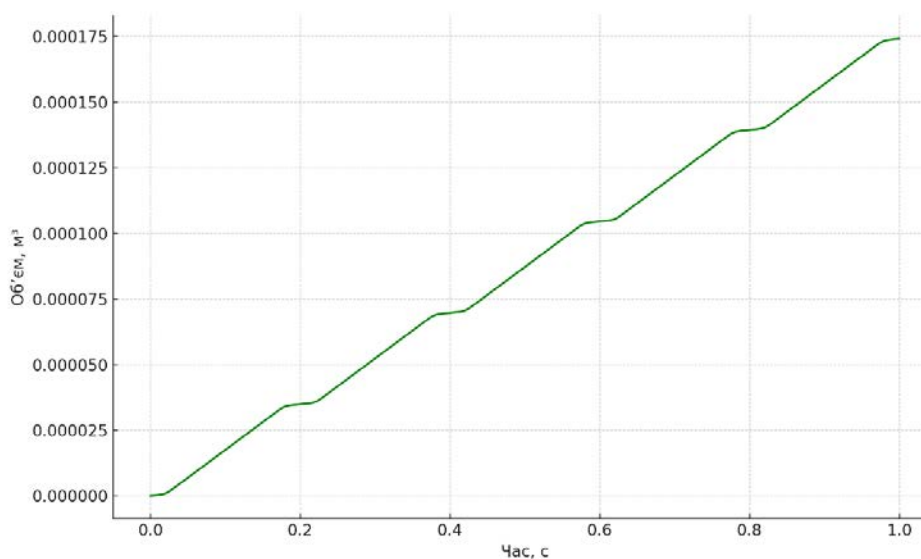


Рис. 1. Інтегральні витрати

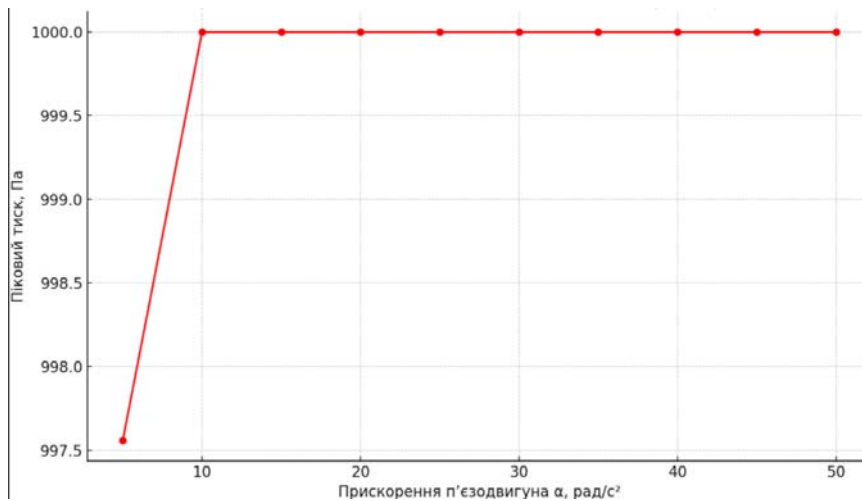


Рис. 2. Залежність тиску від прискорення п'єзодвигуна

Ці параметри обрано з урахуванням реальних обмежень і можливостей сучасних п'єзоелектричних приводів та гнучких трубок, що застосовуються в мікроперекачувальних системах.

Даний графік ілюструє накопичений обсяг рідини, перекачаної насосом за певний період часу. Зростання кривої демонструє кумулятивну подачу, що особливо важливо для дозування в медичних застосуваннях.

Інтегральна витрата показує поступове зростання об'єму, що перекачується, і залежить як від миттєвої витрати, так і від тривалості роботи системи. Її профіль дозволяє судити про стабільність роботи насоса впродовж часу.

У свою чергу, тиск у трубці прямо залежить від ступеня деформації, а отже – від прискорення п'єзодвигуна. Графік залежності тиску демонструє нелінійний характер цього зв'язку: до певного моменту тиск зростає майже лінійно, однак потім починає насичуватись, що пов'язано з пружними властивостями трубки та в'язкістю рідини.

Висновки. У ході виконаного дослідження було розроблено математичну модель класичного перистальтичного насоса з роликівим механізмом, в якому привід здійснюється за допомогою п'єзодвигуна. Завдяки поєднанню аналітичного опису процесів деформації трубки та чисельного моделювання у середовищі MATLAB вдалося оцінити основні гідродинамічні характеристики системи.

Зокрема, встановлено, що:

- інтегральна витрата рідини чітко корелює з параметрами деформаційного впливу, і її профіль дозволяє робити висновки про стабільність і продуктивність насоса;

- взаємозв'язок між параметрами управління і динамікою потоку має нелінійний характер, що потребує обережного підходу при оптимізації режимів роботи.

Отримані результати наочно показали, як керуючі параметри впливають на роботу насоса. Коли збільшуємо амплітуду та частоту збудження п'єзодвигуна, середня кількість рідини, що перекачується за час, зростає майже лінійно, але миттєвий потік залишається пульсуючим – це природна особливість перистальтики. Піковий тиск поводить себе складніше: на малих значеннях керуючих сигналів приріст майже пропорційний, однак після певного порога з'являються різкіші сплески, тому просте «додавання» амплітуди не завжди дає корисний ефект. На рівномірність подачі відчутно впливає ширина зони деформації та форма імпульсу: згладжені імпульси та помірно ширша зона контакту помітно зменшують рівень потоку без суттєвої втрати продуктивності, хоча можуть трохи підвищувати середній опір і робочі тиски.

Додатково зазначимо, що отримана модель показує, що насос можна тонко налаштовувати саме сигналом п'єзодвигуна – без переробки механіки. Практично це означає, що для рівнішої подачі варто починати з середніх частот, більш плавних імпульсів та помірної ширини зони деформації; для максимальної продуктивності – підвищувати частоту й амплітуду, але контролювати пікові тиски. Модель свідомо спрощена, проте дає зрозумілі правила, які легко застосувати у реальних мікрофлюїдних та біомедичних задачах і які надалі можна уточнювати експериментом.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на експериментальне підтвердження отриманих залежностей, а також на розширення моделі шляхом урахування нелінійних механічних властивостей матеріалів трубки, зворотнього впливу рідини на стінки, а також більш складних схем керування приводом.

Список літератури:

1. Jaffrin M. Y., Shapiro A. H. Peristaltic pumping. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1971. Vol. 3, No. 1. P. 13–37. DOI: 10.1146/annurev.fl.03.010171.000305.
2. McIntyre D. Modelling the pulsatile flow rate and pressure response of a roller-type peristaltic pump. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Vol. 325. Art 112708. DOI: 10.1016/j.sna.2021.112708.
3. Grishin A. CFD analysis of miniature peristaltic pump with diverse geometry. *Engineering Research Journal*. 2016. Vol. 65. P. 112–118.
4. Gu Y., Zhu Y., Lin Z., Li D. Piezoelectric peristaltic micropump with novel symmetrical geometry. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2012. Vol. 184. P. 141–146. DOI: 10.1016/j.sna.2012.07.035.
5. Li X., Zhang J., Huang Q. A MEMS piezoelectric micropump with a novel structure and high performance. *Microsystem Technologies*. 2015. Vol. 21. P. 2289–2296. DOI: 10.1007/s00542-014-2290-2.
6. Rohan E., Lukeš V. Multiscale modeling of peristaltic flow in a porous microchannel with piezoelectric actuation. *Computers & Fluids*. 2019. Vol. 191. Art. 104248. DOI: 10.1016/j.compfluid.2019.104248.
7. Jie M., Qi Z., Yu W., Ma T., Cai L., Zhao Y., Gao Y. The Effect of Drive Signals on Output Performance of Piezoelectric Pumps Processes. 2024. Vol. 12, No. 11. Art. 2343. DOI: 10.3390/pr12112343
8. Carotenuto C. Lumped Parameter Modeling and Experimental Characterization of Pressure Effects in a Roller-Type Peristaltic Pump with Neoprene Tubing for Dialysis Machines. *International Journal of Thermofluids*. 2025. Vol. 26. Art. 100508. DOI: 10.1016/j.ijft.2025.101132

Demydenko O.A., Lebedev D.Y., Omelyan A.V. MODELING OF A PERISTALTIC PUMP BASED ON A PIEZOELECTRIC MOTOR

This study presents the development and numerical modeling of a mathematical model for a classical peristaltic pump with a roller mechanism, where the source of motion is a piezoelectric actuator. This approach combines the advantages of compactness, precision, and a contactless drive, which is especially relevant for microfluidic and biomedical applications, where it is crucial to ensure reliable liquid transportation without direct contact with the driving element. The primary goal of the research is to evaluate the impact of the piezoelectric actuator parameters on the integral flow rate and pressure in the system, allowing for the determination of optimal operating conditions.

Based on physical assumptions and the classical peristalsis mechanism, an analytical model is constructed, which describes the change in the radius of the flexible tube under the influence of the roller. The dynamics of the piezoelectric actuator are taken into account, driving the rollers through harmonic pulses with controlled acceleration. To verify the model, a numerical simulation was implemented in the MATLAB environment, resulting in the derivation of the integral flow rate as a function of time, as well as the dependence of the peak pressure on the amplitude of the piezoelectric drive's acceleration.

The results showed that the integral flow rate exhibits a quasi-linear behavior with local fluctuations reflecting the pulsating operation mode of the pump. Meanwhile, the peak pressure demonstrated a nonlinear dependence on the control parameters, indicating the potential for optimizing the pumping modes. The obtained data also allowed an analysis of the impact of the deformation zone width, frequency characteristics of the driving pulse, and channel geometry. The proposed model is suitable for use in both research developments and the creation of compact micro-pumping systems with high controllability and stability.

Key words: peristaltic pump, piezoelectric actuator, mathematical modeling, integral flow rate, microfluidics, roller mechanism.

Дата надходження статті: 09.08.2025

Дата прийняття статті: 23.08.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 621.391.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/10>**Михалевський Д.В.**

Вінницький національний технічний університет

Макогон В.І.

Вінницький національний технічний університет

Ентін І.І.

Вінницький національний технічний університет

ОЦІНЮВАННЯ ПОКРИТТЯ КОРПОРАТИВНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ WI-FI У ПРИМІЩЕННІ

У роботі проведено дослідження випадкових закономірностей, що пов'язані із дією випадкових факторів впливу рознесених у просторі для корпоративних мереж стандарту Wi-Fi. Наведено результати експериментальних досліджень покриття сигналу у приміщеннях для кутового та центрального положень точки доступу, отриманих за допомогою алгоритмів моніторингу. На базі отриманих даних проведено статистичні дослідження та запропоновано середньо-статистичну модель оцінювання покриття із врахуванням дії динамічних факторів впливу на базі інтервалів флуктуацій. Для досліджень було створено умови існування безпроводних каналів із випадковою конфігурацією у різноманітних приміщеннях та відповідною кількістю факторів впливу та враховувався фактор просторового рознесення мереж та незалежних періодів моніторингу.

Встановлено, що незалежно від використовуваного діапазону частот, середньостатистичне значення рівня флуктуації потужності сигналу на вході приймача становило $\pm 2,5$ дБм для приміщень із незначною наповненістю. При заповненні приміщення об'єктами більше 25%, що створює додаткові поверхні відбиття, флуктуації біля архітектурних перешок збільшуються до ± 5 дБм. При існуванні цегляних або бетонних конструкцій флуктуації збільшуються до $\delta = \pm 10$ дБм за ними. Частотний діапазон мережі майже не вносить змін для флуктуацій потужності сигналу. Крім того, центральне положення точки доступу дає можливість чітко визначати внутрішні архітектурні перешки та рівень флуктуації за ними. Це дає підстави стверджувати про середньо-статистичну подібність функціонування мереж стандарту Wi-Fi в умовах дії різного роду факторів впливу, незалежно від розташування.

Вдосконалено узагальнену модель оцінювання покриття корпоративних мереж стандарту Wi-Fi на базі статистичного аналізу експериментальних досліджень, яка враховує існування всіх факторів впливу у приміщенні, а також фактор просторового рознесення мереж та незалежних періодів моніторингу в різних умовах.

Ключові слова: оцінювання, безпроводні канали, експериментальна модель, корпоративна телекомунікаційна мережа, архітектурні перешки, статистичний аналіз.

Постановка проблеми. Відомо [1], що до основних задач, які висуваються на етапі проектування корпоративних телекомунікаційних мереж, можна віднести досягнення максимально можливої пропускної здатності каналу передачі інформації, як базової складової, та його стабільності для будь-якого абонентського пристрою. Але тенденція широкого впровадження безпроводних технологій приводить до появи ряду негативних факторів, які забезпечують виникнення затримок та помилок під час сеансів передачі трафіку [2]. Для мінімізації таких факторів можуть викорис-

товуватись моделі та методи оцінювання основних параметрів каналів із подальшою оптимізацією топології мереж на етапах проектування та експлуатації, які враховують природу та характер впливу. Для підвищення достовірності оцінювання необхідно отримати значну кількість статистичних результатів для встановлення особливостей впливу того чи іншого фактору. Тому, є актуальним, проведення незалежних експериментальних досліджень для підвищення ефективності існуючих моделей оцінювання параметрів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [3], проведено експериментальні дослідження розподілу сигналу у приміщенні для кутового положення точки доступу використовуючи алгоритми моніторингу. Встановлено, що покриття мережі можна охарактеризувати як досить нерівномірну поверхню, із значно вираженими флуктуаціями. Рівень таких флуктуацій збільшується при наближенні до стін та може бути визначений на основі впровадження довірчого інтервалу. Такий фактор має значний вплив на проектування корпоративних мереж, створюючи невизначеність покриття для кожної окремої точки доступу, що показують дослідження у роботі [4]. Умови поширення сигналу у приміщеннях приводить до великих помилок при визначенні місць розташування вузлів для створення оптимального покриття. Одним із напрямків підвищення достовірності оцінювання покриття мережі можна виконувати на базі аналізу експериментальних досліджень квадратичними функціями. Такі дослідження було проведено у роботі [5]. Встановлено, що існування значних флуктуацій спостерігається до двох метрів від точки доступу із значно вираженими максимумами, які в подальшому зменшуються. Щодо середньостатистичного значення флуктуацій, то біля стін вони мають менший інтервал відхилення, навіть при наявності великої кількості відбиваючих поверхонь. Доведено, при симетричному поділу розмірів приміщення, для розподілу потужності сигналу є характерним представлення сигналу як модель затухання у вільному просторі, але при умові мінімального впливу відбиваючих поверхонь. Таким чином за результатами досліджень можна стверджувати, що використовувати квадратичне затухання за координатами довжини та ширини є найбільш оптимальним для оцінювання покриття мережі у приміщеннях. Для оцінювання впливу архітектурних перешкод та ефекту багатопроменевого поширення хвиль доцільно використовувати інтервал флуктуацій основного енергетичного параметра, для врахування будь-яких змін параметрів середовища передачі в режимі реального часу.

Існування різних типів перешкод значно обмежує продуктивність безпроводних каналів корпоративних телекомунікаційних мереж, що можна порівняти із дією DoS-атак [6]. Як наслідок, виникають помилки у кадрах, що приводить до збільшення циклів повторної передачі. Подібну інтерференційну картину отримано для частотного діапазону 5 ГГц, за рахунок великої кіль-

кості відбиваючих поверхонь у приміщеннях, яку можна оцінювати на основі квадратичної функції [7]. Крім того, на оцінювання покриття мережі мають вплив фактори що відносяться до характеристик приймальної частини пристроїв стандарту 802.11 [8-9]. Їх можна поділити на дві групи: енергетичні (положення приймально-передавального обладнання в просторі, попадання пристрою в максимум або мінімум характеристик розподілу сигналу у приміщенні, чутливість, характеристики антен та ін.) і інформаційні (повторні цикли передачі кадрів і пакетів, джиттер, додаткова службова інформація та ін.) [10-11]. В більшості випадків відмінності у приймально-передавальному тракті різних виробників можна оцінювати на основі додаткових коефіцієнтів флуктуацій параметрів моделей оцінювання покриття. Таким чином, досить важливим фактором, який впливає на моделі оцінювання можна вважати і параметри приймально-передавального обладнання різних виробників, із врахуванням факторів обмеження пропускної здатності внутрішньої шини обміну даними та чутливості [12]. Достовірність методів та адекватність запропонованих моделей залежить від кількості проведених експериментальних досліджень, на основі яких, отримано коефіцієнти та допустимі границі, що підтверджують доцільність застосування квадратичних функцій та використання інтервалів флуктуацій їх параметрів. Проте, такі дослідження не враховують особливості просторового рознесення мереж, спостереження різних періодів моніторингу та використання випадково-конфігурованого обладнання. Тому, для підвищення достовірності існуючих методів та моделей оцінювання основних параметрів корпоративних телекомунікаційних мереж, є актуальним провести ряд незалежних досліджень для визначення впливу вказаного фактору.

Метою статті є оцінювання фактору впливу просторового рознесення мереж та випадково-конфігурованого обладнання в різних умовах при побудові корпоративних телекомунікаційних мереж стандарту Wi-Fi та отримання середньостатистичної моделі поширення сигналу у приміщенні із врахуванням дії динамічних факторів впливу на базі інтервалів флуктуацій.

Виклад основного матеріалу. Для оцінювання впливу випадково-конфігурованого обладнання було проведено ряд експериментальних досліджень. Для цього використано обладнання стандарту Wi-Fi різних виробників та налаштування за замовчуванням, враховуючи стандарти Wi-Fi 4,

Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6. Для врахування просторового рознесення та різноманітних умов, локальні мережі розгортались у непов'язаних між собою приміщеннях. Структура мережі для проведення дослідження наведено на рис. 1.

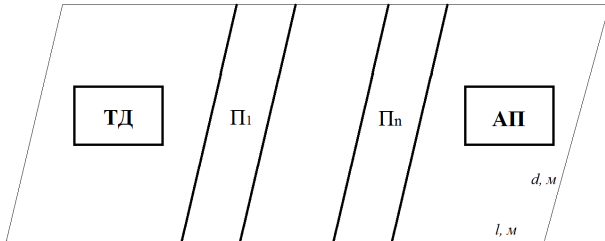


Рис. 1. Результати експериментальних досліджень для кутового положення точки доступу у приміщенні

Методика досліджень передбачає створення безпроводного каналу, у приміщенні за допомогою приймально-передавального обладнання точки доступу (ТД) та абонентського пристрою (АП) стандарту Wi-Fi, як вимірювального засобу із застосуванням вбудованих алгоритмів та програмних додатків моніторингу для вимірювання потужності сигналу на вході приймача P_m [3].

В каналі, для різних приміщень, існувати архітектурні перешкоди $\Pi_1 \dots \Pi_n$. Дослідження проведено незалежними дослідниками, вибір частотного діапазону та смуги каналу не обмежувався. Випромінювальна потужність ТД встановлювалась за замовчуванням, що для нашого регіону становить 100 мВт.

Використовуючи наведену методику досліджень, отримано значну кількість поверхонь поширення сигналу у приміщеннях. Аналіз експериментальних досліджень проведено на базі статистичних методів та представлено результати, які мають відхилення від середньостатистичного значення і поділено на групи для кутового та центрального положення ТД, згідно [3,5].

Найбільш вагомими результатами досліджень для кутового положення точки доступу, наведено на рис. 2.

Результати на рис. 2 показують існування флуктуацій, які спричинені фактором існування складної інтерференційної картини, що є багатопроменим поширенням хвиль. Рівень флуктуацій залежить від значної кількості відбиваючих поверхонь. Отримані результати мають аналогічну характеристику як і у роботі [3]. На базі ста-

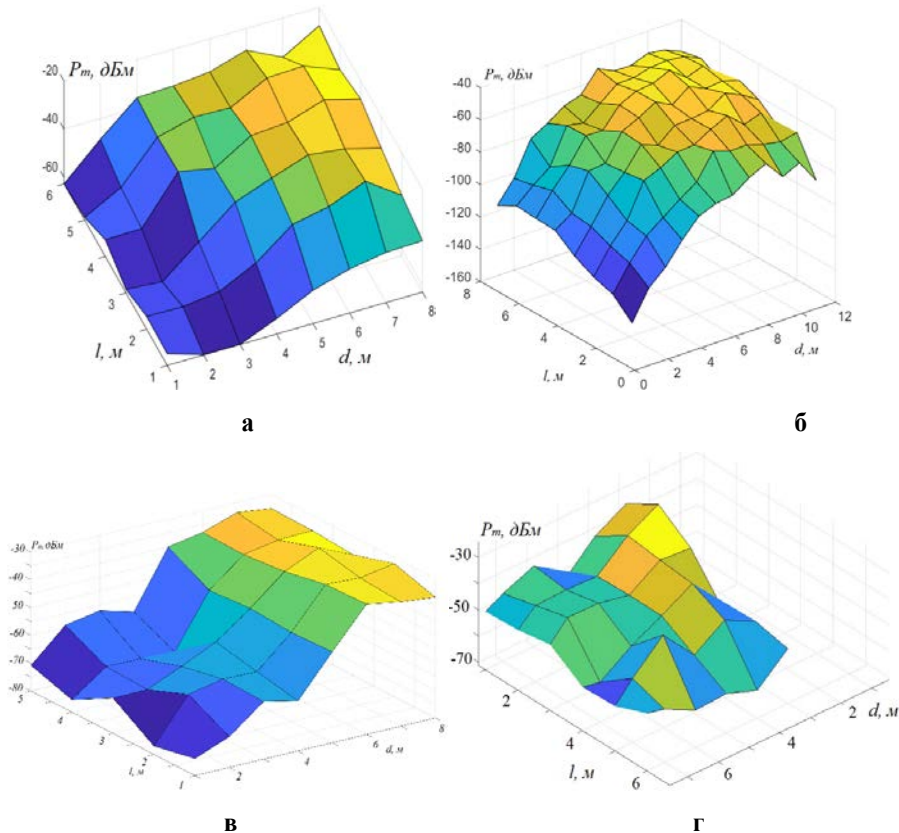


Рис. 2. Результати експериментальних досліджень для кутового положення точки доступу у приміщенні

тистичного аналізу, встановлено, що зафіксоване середньостатистичне значення рівня флуктуації потужності сигналу на вході абонентського пристрою становить $\delta = \pm 2,5$ дБм (див. рис. 1, а,б), для приміщень із незначною наповненістю, та $\delta = \pm 5$ дБм (див. рис. 1, в,г), при існуванні значної кількості об'єктів та поверхонь відбиття. Крім того, останній інтервал показує безпосередню близькість до архітектурних перешкод у приміщеннях, за якими рівень флуктуації збільшується до $\delta = \pm 10$ дБм, особливо при використанні цегляних та бетонних конструкцій. Використання різних частотних діапазонів значного впливу на рівень флуктуації не мало.

Результати досліджень для центрального положення точки доступу [5] наведено на рис. 3.

В даному випадку, підтверджується встановлене твердження пов'язане із існуванням максимуму концентрації енергії випромінювання на відстані до двох метрів від випромінюючої антени точки доступу. Хоча, з точки зору приймального пристрою, не завжди спостерігається, що дає можливість ним нехтувати при оцінюванні покриття мереж стандарту Wi-Fi на базі експериментальних моделей. Це є доцільним для багатьох пристроїв із низькою чутливістю, а також їх використання, як контрольних засобів оцінювання покриття при довільному

положенні у просторі, що підтверджується статистичним аналізом отриманих результатів досліджень. Інтервал флуктуації є дещо меншим за рахунок кращого покриття при існуванні незначних архітектурних перешкод (див. рис. 3. а, б).

Аналогічно до попереднього випадку, частотний діапазон мережі майже не вносить змін у рівень флуктуації основного енергетичного параметра сигналу. Крім того, центральне положення точки доступу дає можливість чітко визначати внутрішні архітектурні перешкоди та рівень флуктуації за ними, як видно із рис. 2. в, г.

Враховуючи отримані результати у роботах [3, 5, 7] та статистичний аналіз отриманих експериментальних досліджень, можна стверджувати, що найбільшу ефективність оцінювання покриття корпоративних мереж стандарту Wi-Fi у приміщеннях, дає функція затухання за координатами l і d на основі поліноміальної моделі за значенням 2. Таким чином, модель покриття мережі можна записати так:

$$\begin{cases} P_{Rx}(l) = al^2 + bl + P_0 + \delta, \\ P_{Rx}(d) = kd^2 + nd + P_0 + \delta. \end{cases} \quad (1)$$

де a, b, k, n – коефіцієнти затухання сигналу по відповідній координаті; P_0 і δ – початковий рівень із інтервалом флуктуації.

Рівняння (1) показує середньостатистичну модель для всіх випадків досліджень. Але на

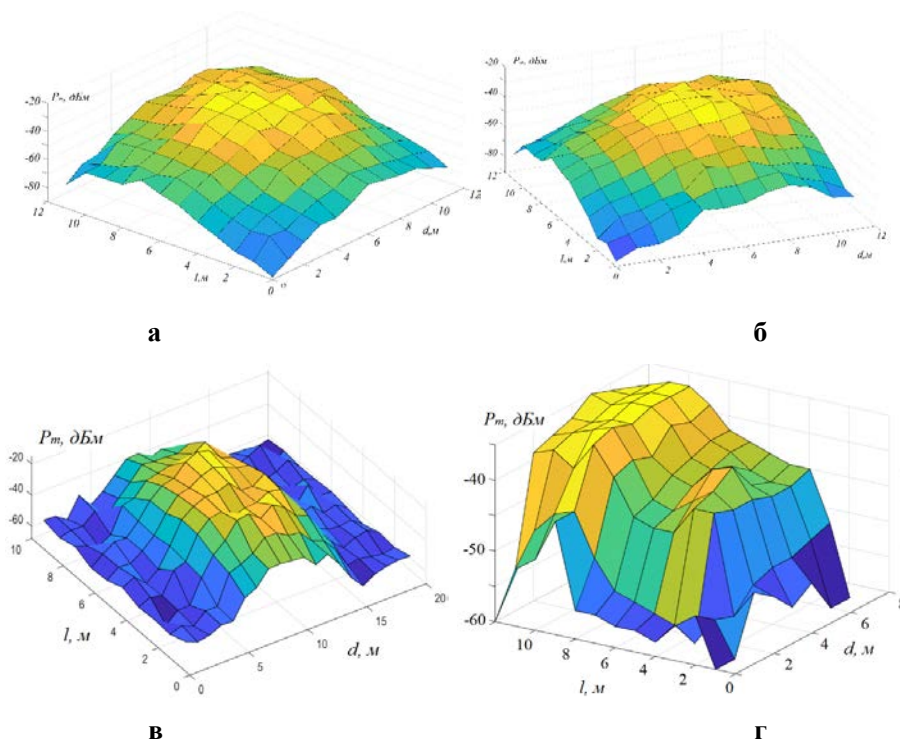


Рис. 3. Результати експериментальних досліджень для центрального положення точки доступу у приміщенні

графіках спостерігаються відхилення, які мають виражені максимуми та мінімуми в певних інтервалах. Такі інтервали можна визначати через границі інтервалів флуктуацій основного параметра [3]. Але, додатково спостерігається відхилення що спричинене додатковими факторами впливу що існують в різних приміщеннях та відхиленням технічних показників у випадково-конфігурованого обладнання. Тому, враховуючи інтервали флуктуацій та контрольний абонентський пристрій, для будь-якого положення у приміщенні як $(l_0; d_0)$, модель (1) для будь-якого вимірювального пристрою можна записати так:

$$\begin{cases} P_{rx}(l) = (a \pm \Delta a \pm \Delta_1)(l^2 - l_0^2) + (b \pm \Delta b \pm \Delta_2)(l - l_0) + P_m + \delta, \\ P_{rx}(d) = (k \pm \Delta k \pm \Delta_3)(d^2 - d_0^2) + (n \pm \Delta n \pm \Delta_4)(d - d_0) + P_m + \delta. \end{cases} \quad (2)$$

де P_m – вимірювальне значення потужності сигналу на вході приймача, яке також можна визначити як середньостатистичне значення на базі виразу:

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{np,i}, \quad (3)$$

де $P_{np,i}$ – потужність що прив'язана до циклу моніторингу; n – кількість циклів вимірювань для отримання відповідної достовірності оцінювання. $\Delta a, \Delta b, \Delta k, \Delta n$ – відповідні інтервали флуктуацій коефіцієнтів згасання сигналу. $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ – додаткові інтервали флуктуацій що залежать від факторів в різних приміщеннях

Вираз (2) враховує існування всіх факторів впливу у приміщенні, під час оцінювання покриття

корпоративних мереж стандарту Wi-Fi, а також дає можливість встановлювати дію динамічних факторів впливу що виникають при використанні випадково-конфігурованих безпроводних каналів стандарту Wi-Fi в різних умовах, безпосередньо з точки зору абонента.

Висновки. Таким чином, на основі проведених досліджень корпоративних телекомунікаційних мереж стандарту Wi-Fi встановлено, що в більшості випадків, вплив фактору просторового рознесення мереж та випадково-конфігурованого обладнання можна охарактеризувати, як середньостатистичну подібність функціонування в умовах дії різного роду факторів впливу, незалежно від розташування. Підтверджено, що оптимальною функцією оцінювання поширення сигналу у приміщенні є квадратичне згасання за координатами довжини та ширини приміщення для кутового та центрального положень точки доступу незалежно від частотного діапазону. Встановлено, що ефективність оцінювання покриття корпоративних мереж стандарту Wi-Fi залежить від встановлення меж інтервалів флуктуацій сигналу, що дає можливість врахувати будь-які зміни параметрів середовища передачі в режимі реального часу. Вдосконалено узагальнену модель оцінювання покриття корпоративних мереж стандарту Wi-Fi на базі статистичного аналізу експериментальних досліджень із врахуванням фактору використання випадково-конфігурованого обладнання в різноманітних умовах приміщень.

Список літератури:

1. Zhurakovskiy B., Boyko J., Druzhynin V., Zeniv I., Eromenko O. Increasing the efficiency of information transmission in communication channels. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2020. №19 (3). Pp. 1306–1315, DOI: 10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1306-1315.
2. Mykhalevskiy D. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №6/9 (108). Pp. 18–24. DOI: 10.15587/1729–4061.2020.218720.
3. Mykhalevskiy D. Development of a spartial method for the estimation of signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4/9 (88). Pp. 29–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.106925.
4. Yang H. Reliable RSS Indoor Location Systems Based on Signal Distribution. *SSRG International Journal of Industrial Engineering*. 2024. №11 (3). Pp. 1-4. DOI: 10.14445/23499362/IJIE-V11I3P102.
5. Mykhalevskiy D., Vasylykivskiy N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4/9 (88). Pp. 38–43. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.
6. Haider Z., Saleem M., Jamal T. Analysis of Interference in Wireless Networks. arXiv:1810.13164v1. 2018. Pp. 1-9. DOI: 10.48550/arXiv.1810.13164
7. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the input to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. №6/9 (96). Pp. 16–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983.
8. Михалевський Д.В. Дослідження факторів впливу на оцінювання основних параметрів безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. №6. С. 107–114. DOI: 10.31649/1997-9266-2020-153-6-107-114.

9. Михалевський Д.В. Аналіз параметрів сигналу у каналах стандарту 802.11g при спектральних завадах. *Proceeding of the International Scientific and Practical Conf. "MSATPA"* (Oct. 20-22) 2014 Dubai. 2014. Pp. 33-37.
10. Hussain S., Bhadri N., Hussain S. Advancements in Wireless Communication. *International Journal of Electronics and Communication*. 2020. № 7(9). Pp 1-4. DOI: 10.14445/23488549/IJECE-V7I9P101.
11. Zhang X., Chu F. Multimedia Real-Time Transmission Protocol and Its Application in Video Transmission System. *Comput Intell Neurosci*. 2022 May 23;2022:8654756. DOI: 10.1155/2022/8654756.
12. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. *Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing. Conference Proceeding*. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine. Pp. 369-372.

Mykhalevskiy D.V., Makogon V. I., Entin I.I. ASSESMENT OF COVERAGE OF CORPORATE WIRELESS NETWORKS OF THE WI-FI STANDARD IN THE ROOM

In this paper, studies random patterns associated with the action of random spatially distributed influence factors for corporate Wi-Fi networks. The results of experimental studies of signal coverage in rooms for corner and central positions of the access point, obtained using monitoring algorithms, are presented. Based on the data obtained, statistical studies were conducted and an average statistical model for assessing coverage was proposed, considering the action of dynamic influence factors based on fluctuation intervals. For the studies, conditions were created for the existence of wireless channels with a random configuration in different types of rooms and the corresponding number of influence factors, and the factor of spatial diversity of networks and independent monitoring periods was considered.

Established that regardless of the frequency range used, the average statistical value of the level of signal power fluctuation at the receiver input was ± 2.5 dBm for rooms with a small occupancy. When the room is filled with objects by more than 25%, which creates additional reflecting surfaces, fluctuations near architectural obstacles increase to ± 5 dBm. In the presence of brick or concrete structures, fluctuations increase to $\delta = \pm 10$ dBm behind them. The network frequency range makes almost no changes to signal power fluctuations. In addition, the central position of the access point makes it possible to clearly determine internal architectural obstacles and the level of fluctuations behind them. This gives grounds to assert the average statistical similarity of the functioning of Wi-Fi standard networks under the influence of various types of influencing factors, regardless of location.

A generalized model for assessing the coverage of corporate Wi-Fi standard networks has been improved based on statistical analysis of experimental studies, which considers the existence of all influencing factors in the room, as well as the factor of spatial separation of networks and independent monitoring periods in different conditions.

Key words: *assessment, wireless channels, experimental model, corporate telecommunications network, architectural obstacles, statistical analysis.*

Дата надходження статті: 29.08.2025

Дата прийняття статті: 15.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Міхненко Я.О.

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОСЛУГ ДЛЯ БАГАТОКОРИСТУВАЧЬКОГО СЕРЕДОВИЩА В КОГНІТИВНІЙ РАДІОМЕРЕЖІ

У даній роботі досліджено застосування технології когнітивного радіо (Cognitive Radio Technology, CRT) з метою оптимізації використання обмеженого радіочастотного спектра та забезпечення високої якості обслуговування (QoS) у багатокористувацькому середовищі. У зв'язку зі стрімким розвитком мобільної індустрії та зростанням кількості користувачів мобільних пристроїв, ключовим завданням операторів зв'язку стає ефективне управління спектральними ресурсами, що дозволяє уникнути перевантаження мережі, знизити затримки та запобігти втраті даних. Для вирішення цього завдання було запропоновано два нових підходи: метод локалізації з урахуванням локалізованості (Localizability Aided Localization, LAL) та метод наповнення водою (Water Filling).

У рамках дослідження проведено порівняльний аналіз класичних протоколів маршрутизації – AOMDV (Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing) та AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector). Для реалізації запропонованих методів базовий протокол AODV було доповнено алгоритмами AOMDV та DSR, що дозволило інтегрувати LAL і Water Filling відповідно. Розроблені рішення спрямовані на оптимізацію маршрутизації та раціональний розподіл потужності між каналами, що є критично важливим у когнітивних радіомережах із наявністю первинних (PU) та вторинних (SU) користувачів.

Моделювання здійснювалося з використанням інструменту Network Simulator 2 (NS-2), а оцінка продуктивності виконувалася за трьома ключовими метриками: пропускна здатність (throughput), коефіцієнт доставки пакетів (Packet Delivery Ratio, PDR) та затримка (delay). Результати експериментів показали, що метод LAL на основі протоколу AOMDV забезпечує вищу пропускну здатність та мінімальну затримку, тоді як метод Water Filling, реалізований у поєднанні з DSR, демонструє кращі показники PDR. У свою чергу, традиційний алгоритм AODV поступається обом удосконаленим рішенням за всіма обраними параметрами.

Таким чином, у роботі доведено, що запропоновані методи здатні істотно підвищити якість обслуговування користувачів у когнітивних радіомережах. Впровадження методик LAL та Water Filling дозволяє не лише раціональніше використовувати спектральні ресурси, але й створює основу для подальшої інтеграції в системи нового покоління, де вимоги до QoS та QoE будуть ще більш критичними. Отримані результати можуть бути корисними для розробників протоколів маршрутизації, операторів мобільних мереж та дослідників у сфері бездротових комунікацій.

Ключові слова: когнітивні радіомережі, якість обслуговування, маршрутизація, оцінка продуктивності.

Постановка проблеми. В умовах інтенсивного технологічного розвитку та швидкого зростання мобільної індустрії, щоденне збільшення кількості користувачів мобільних пристроїв висуває на перший план проблему забезпечення повсюдного доступу до мережі. Протягом наступних двох-трьох десятиліть постачальники мережевих послуг стикнуться з низкою викликів, пов'язаних із наданням якісного доступу до радіочастотного спектра. Зокрема, у контексті зростання абонентської бази особливо гостро постає завдання

підтримки високої якості обслуговування (QoS) в умовах дефіциту радіочастотного ресурсу.

Зважаючи на майбутнє впровадження технологій 5G/6G, суспільство потребуватиме безперешкодного доступу до радіочастотного спектра для стабільного функціонування різноманітних сервісів. Це створює потенційний ризик виникнення так званого «вузького місця» (bottleneck) для операторів зв'язку. Отже, в умовах одночасного користування мережею значною кількістю абонентів, ключовим завданням стає ефективне

використання наявного спектра, що гарантує мінімальні затримки та запобігає втраті даних.

Метою роботи є розв'язання проблеми забезпечення високої якості обслуговування (QoS) в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу. Основним завданням дослідження є мінімізація втрат і затримок у мережі. У рамках роботи розглядається модель мережевого середовища, що передбачає взаємодію первинних (PU) та вторинних (SU) користувачів.

У ході дослідження було проаналізовано передачу сигналу від первинного користувача (PU) до вторинного користувача (SU). Застосування різних алгоритмів дозволило провести порівняльний аналіз таких ключових параметрів, як затримка, пропускна здатність та коефіцієнт доставки пакетів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У праці [1] досліджено механізм спільного використання ресурсів кількома мережевими вузлами. Ці вузли розташовані на оптимальній відстані від джерела постачання та працюють з мінімальною затримкою. Автори порівняли динамічну та статичну схеми, застосували динамічний підхід для оптимізації затримки. Завдяки такому рішенням вдалося досягти зменшення рівня відмов на 20%, що сприяло підвищенню якості обслуговування (QoS). Водночас у роботі не було проаналізовано джитер, який є одним із важливих показників для оцінки продуктивності мережесистем.

У статті [2] досліджено оптимальний розподіл потужності у багатокористувацькій когнітивній радіомережі (CRN) з метою максимізувати загальну ефективну пропускну здатність мережі з урахуванням обмежень на потужність та вимог щодо захисту первинних користувачів (PU). Запропоновано два ітераційні алгоритми, які, однак, є обчислювально складними. На противагу цьому, у даній роботі представлено простий та ефективний підхід.

Робота [3] зосереджена на проблемах розподілу каналів і вибору мережі в гетерогенних мережах 5G. Запропоновано дві двоцільові моделі, перша модель передбачала розподіл вторинних користувачів (SU) між мережами з урахуванням таких параметрів, як вартість, доступна швидкість передавання даних та допустимий рівень інтерференції, а у другій моделі первинні вузли (PN) були розподілені за каналами, а вторинні користувачі – призначені до каналів, виходячи з їхніх додаткових вимог щодо низької затримки.

Однак, запропонована модель складається з великої кількості обчислень та математичних виразів, що дуже ускладнює валідацію даних.

У статті [4] представлено метод інтелектуального динамічного розподілу спектра. Він ґрунтується на виборі найбільшого доступного спектрального інтервалу для досягнення максимально можливої швидкості передавання даних. Автори запропонували теоретичну модель для визначення ймовірного розподілу довжини цього інтервалу. Однак, оскільки ця модель є гіпотетичною, вона дає змогу моделювати будь-яку кількість каналів, але не враховує практичних сценаріїв.

У роботі [5] проведено аналіз оптимальної стратегії розподілу ресурсів для заглушення (jamming) у двоканальній системі зв'язку типу ALOHA з тривалими затримками, що включає численні термінали когнітивного радіо. У зв'язку з розподілом ресурсів для заглушення спостерігається незначне збільшення затримки передавання.

У роботі [6] досліджено розподілену схему розподілу потужності, що ґрунтується на підході Н-альфа керування. Їхнє дослідження враховує затримку та мінливість коефіцієнта підсилення каналу в когнітивній радіомережі (CRN). Автори стверджують, що підвищення ефективності зв'язку досягається завдяки запропонованому алгоритму розподілу потужності. Крім того, вони зазначають, що такі вдосконалені рішення є перспективними для застосування в технології 5G.

У роботі [7] досліджено ефективність генетичних алгоритмів як інтелектуального методу керування. Метою було визначення оптимальних параметрів поширення та передавання радіосигналу з урахуванням впливу навколишнього середовища та обмежень щодо якості обслуговування (QoS). Однак, зазначена стаття аналізує параметри передавання лише для одного каналу.

У роботі [8] проаналізовано ефективність забезпечення якості обслуговування (QoS) у гетерогенних системах із великою кількістю різнорідних вузлів шляхом застосування різних методів оптимізації. Результати дослідження показують, що приріст продуктивності за рахунок використання модуля AQUA у гетерогенних 5G-системах з різними радіодоступними мережами (RAN) є вищим за умови наявності більшої кількості доступних гетерогенних вузлів.

У статті [9] розширюється розуміння майбутніх мереж п'ятого покоління, акцентуючи увагу на концепції QoE. Крім того, аналізується вплив ключових викликів, що пов'язані з 5G, на якість досвіду користувачів, про що також йдеться у джерелах сучасній літературі.

У роботі [10] досліджено стратегії вибору спектра для когнітивної радіомережі (CRN) та

запропоновано підхід до порівняння алгоритмів вибору каналів на основі основних експлуатаційних параметрів з метою зменшення загального часу прийняття рішень. Основна мета – мінімізувати загальний час роботи системи при збереженні ефективної продуктивності.

Виклад основного матеріалу. З метою підвищення якості обслуговування (QoS) користувачів, у роботі запропоновано застосування двох методів: локалізації з урахуванням локалізованості (LAL) та Water Filling. Для їх реалізації було обрано протоколи маршрутизації AOMDV та DSR відповідно. Крім того, в роботі розглядається техніка балансування навантаження, в основі якої лежить базовий протокол маршрутизації AODV. Важливо зазначити, що протокол AOMDV забезпечує встановлення нових маршрутів за запитом, створює петльонезалежні вузли, підтримує стабільне з'єднання та вирізняється високою ефективністю під час відновлення після збоїв [11; 12].

Метод локалізації є поширеною технікою у багатьох мережевих системах. Запропонований у даній роботі підхід ґрунтується на використанні протоколу маршрутизації AOMDV.

Однак, цей метод має певне обмеження, яке полягає у необхідності побудови карти вершин. У реальних системах, мережі не завжди є повністю локалізованими, що призводить до наявності теоретично нелокалізованих вузлів.

Метод LAL (Localizability Aided Localization) складається з трьох ключових етапів:

- перевірка локалізованості вузлів;
- корекція мережі;
- побудова дерева сегментів.

З огляду на локалізованість вузлів, усі модифікації, що вносяться методом LAL, є обґрунтованими та доцільними.

На основі результатів моделювання буде продемонстровано, як метод LAL (Localizability Aided Localization) забезпечує ефективне керування процесом корекції та підвищення продуктивності мережі.

Алгоритм Water Filling є оптимальним рішенням для максимізації енергії каналу з динамічними частотними характеристиками, оскільки він адаптивно регулює передану потужність відповідно до коефіцієнта підсилення каналу. У цій роботі запропоновано інтеграцію керування потужністю за допомогою алгоритму Water Filling з протоколом маршрутизації DSR (Dynamic Source Routing) для підвищення пропускної здатності когнітивної радіосистеми.

Традиційна реалізація алгоритму Water Filling не може бути безпосередньо застосована в ког-

нітивних системах через наявність додаткових обмежень щодо потужності. З огляду на це, в даній роботі алгоритм реалізується ітераційно для досягнення оптимального керування передачею. Застосування ітераційного підходу дозволяє ефективно вирішити задачу розподілу потужності, одночасно знижуючи обчислювальну складність.

Розглянуто зразкову когнітивну радіомережу (CRN), яка включає первинних (Primary Users) та вторинних (Secondary Users) користувачів. У ній вузли з позначеннями P1–P8 виконують роль первинних, а вузли S1–S4 – вторинних користувачів. На прикладі цієї мережі демонструється передавання даних від вузла P5 до вузла S2, де вузол P5 є ініціатором передачі, а S2 – приймачем.

У процесі передавання застосовуються запропоновані методи, які визначають критерії вибору наступного вузла для подальшої маршрутизації до кінцевого пункту призначення.

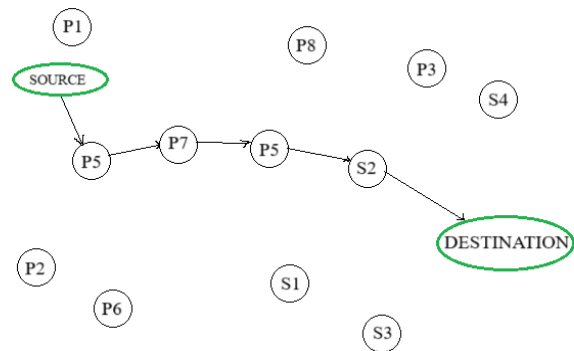


Рис. 1. Процес обміну інформації між вузлами

На рис. 1 візуалізовано процес обміну інформацією між вузлами, що ілюструє передачу даних від джерела до пункту призначення. Вибір наступного вузла для подальшої маршрутизації здійснюється відповідно до застосованого алгоритму.

Результати моделювання отримані на основі цієї схеми передачі з використанням різних алгоритмів для кожного окремого сценарію. Порівняльний аналіз, проведений для кожного з алгоритмів, базується на трьох ключових показниках: пропускній здатності (throughput), затримці (delay) та коефіцієнті доставки пакетів (PDR – packet delivery ratio).

Ідеальну мережу, представлену на рис. 2-3, було змодельовано за допомогою інструменту Network Simulator 2 (NS-2). Програмний код симуляції реалізовано мовою TCL (Tool Command Language).

Симуляція проводилася відповідно до послідовності, зображеної на рисунку 3. Було змодельовано та порівняно три методики:

1. Локалізація з урахуванням локалізованості (LAL), що базується на протоколі маршрутизації AOMDV.

2. Метод Water Filling, який використовує протокол маршрутизації DSR (Dynamic Source Routing).

3. Існуючий підхід, а саме – алгоритм згладжування навантаження (Load-based Smoothing Algorithm), реалізований на основі протоколу AODV.

Результати моделювання цих трьох методик наведено нижче для порівняльного аналізу.

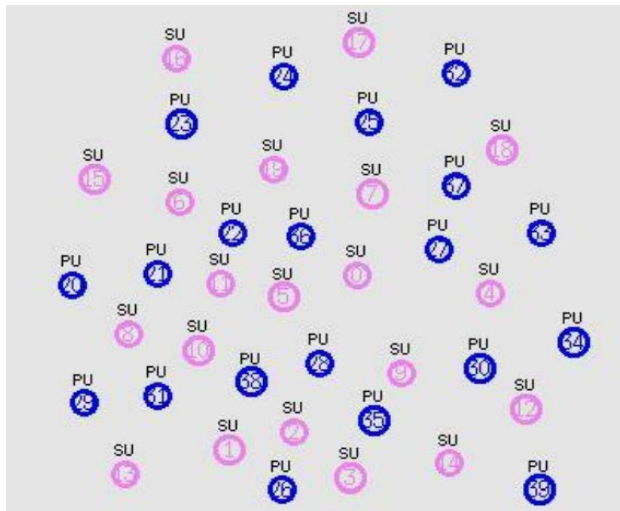


Рис. 2. Представлення ідеальної мережі в застосунку NS-2

Згідно з результатами моделювання, представленими на рисунку 4, найбільший коефіцієнт доставки пакетів спостерігається у протоколу

DSR. Це пояснюється його унікальними особливостями та високою ефективністю. Водночас, протокол AOMDV демонструє кращі результати у порівнянні з традиційним AODV.

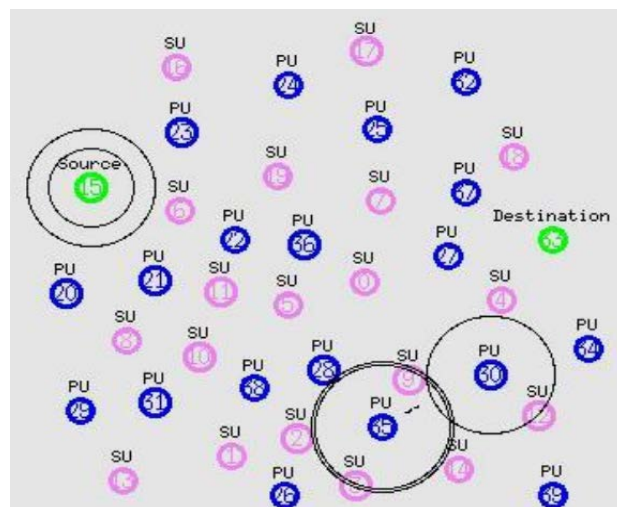


Рис. 3. Представлення процесу обміну інформації між вузлами в застосунку NS-2

Згідно з результатами моделювання, представленими на рисунку 4, найбільший коефіцієнт доставки пакетів спостерігається у протоколу DSR. Це пояснюється його унікальними особливостями та високою ефективністю. Водночас, протокол AOMDV демонструє кращі результати у порівнянні з традиційним AODV.

Коефіцієнт пропускної здатності, представлений на рис. 5, визначається як обсяг даних, що успішно передано з однієї точки в іншу за певний проміжок часу.

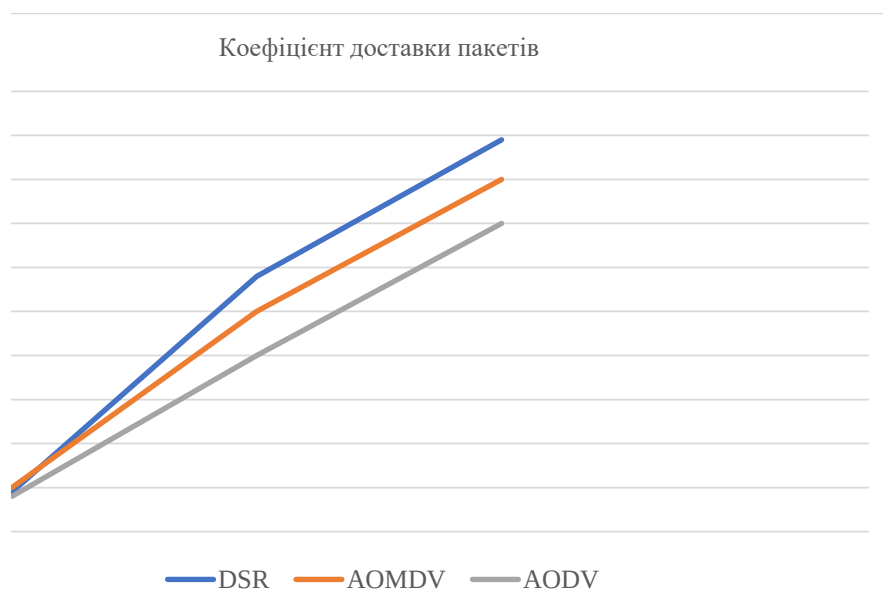


Рис. 4. Відношення часу до коефіцієнту доставки пакетів

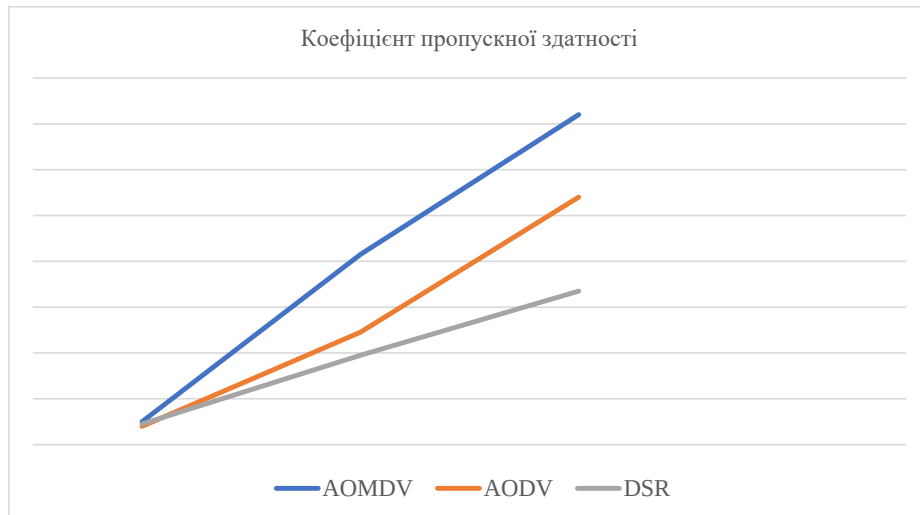


Рис. 5. Відношення часу до коефіцієнту пропускної здатності

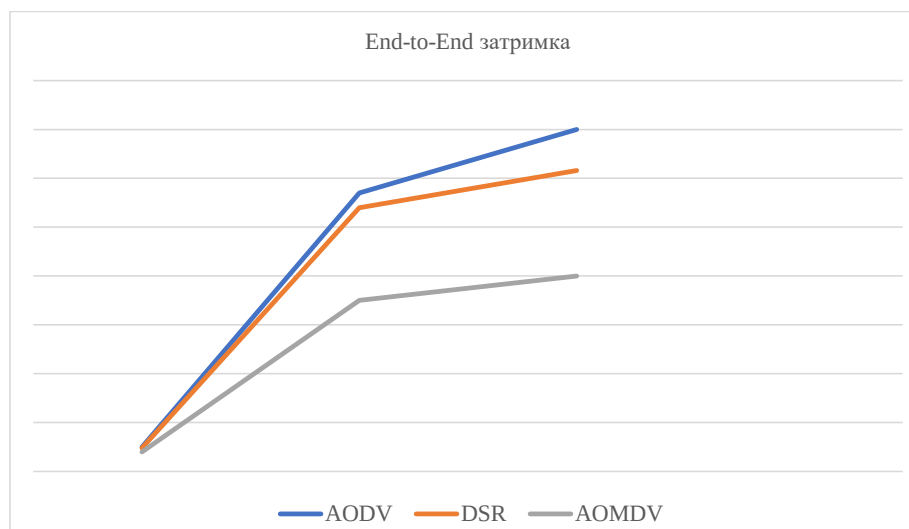


Рис. 6. Відношення часу до передачі пакетів

Згідно з результатами моделювання, наведеними на рис.5, видно, що пропускна здатність є вищою для протоколу AOMDV у порівнянні з DSR та AODV. Протокол AOMDV демонструє високу ефективність у передаванні даних між вузлами за короткий проміжок часу.

Отже, виходячи з результатів моделювання, наведених на рис. 4 і 5, якщо пріоритетом є вищий коефіцієнт доставки пакетів (PDR) навіть за умови певних втрат, доцільно обрати алгоритм DSR.

Натомість, якщо метою є висока пропускна здатність, тобто передавання великого обсягу даних за короткий час, навіть із певними втратами, оптимальним вибором буде техніка AOMDV.

У роботі аналізуємо три ключові показники: пропускну здатність (throughput), затримку (delay) та коефіцієнт доставки пакетів (PDR).

Результати цього аналізу представлені у вигляді графіків, отриманих під час моделювання.

Коефіцієнт доставки пакетів визначається як співвідношення кількості пакетів, надісланих від вузла-джерела до вузла-призначення, до загальної кількості переданих пакетів.

Результати моделювання затримки «точка-точка» (point-to-point delay) представлено на рис. 6.

Згідно з отриманими даними, алгоритм AOMDV демонструє найменшу затримку порівняно з AODV та DSR. Другим за ефективністю є DSR, який також перевершує традиційний алгоритм AODV за цим показником.

Таким чином, результати моделювання підтверджують, що запропоновані алгоритми AOMDV та DSR є ефективнішими за традиційний AODV щодо часу затримки.

Висновки. У цій роботі проведено моделювання передачі даних від вузла-ініціатора до вузла-призначення в когнітивній радіомережі.

Були використані та порівняні такі протоколи маршрутизації, як AOMDV, DSR та AODV.

З метою підвищення ефективності були запропоновані два методи: локалізація з урахуванням локалізованості (LAL), реалізована на основі

протоколу AOMDV, та метод Water Filling, що використовує протокол DSR. Крім того, як існуючий підхід було розглянуто алгоритм балансування навантаження, що функціонує на протоколі DSR.

Список літератури:

1. Satyanarayan K, Padaganur and Jayashree D.Mallapur, 'Load sharing based on optimized qos parameters for heterogeneous networks, 4th Int'l Conf. on Recent Advances in Information Technology, 2018, DOI:10.1109/RAIT.2018.8389088.
2. Samoda Gamage, Duy T. Ngo, and Jamil Y. Khan, "Statistical DelayQoS Driven Resource Allocation for Multiuser Cognitive Radio Networks", 2018 IEEE *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, DOI: 10.1109/WCNC.2018.8377062.
3. Mara Bukvi, Bogdana Stanojević, Milan Stanojević, "Multiple Objective Channel Allocation Problem in 5G Networks", 2018 7th *International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC)*, DOI: 10.1109/ICCCC.2018.8390454.
4. Sepehr Khodadadi, Dongyu Qiu, and Yousef R. Shayan, "Performance Analysis of Secondary Users in Cognitive Radio Networks with Dynamic Spectrum Allocation", 2018.2844366, *IEEE*, DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2844366.
5. Rong Shi and Yue Xiao, "Jamming Strategy Optimization for DualChannel ALOHA Network with Long Time Delay", 2018 10th *International Conference on Communication Software and Networks*, DOI: 10.1109/ICCSN.2018.8488223.
6. Shuying Zhang and Xiaohui Zhao, "Distributed Power Allocation for Cognitive Radio Networks with Time-Varying Channel and Delay: H1 State Feedback Control Approach", 2018.2873804, *IEEE Access*, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2873804.
7. Saranga Sarma, Manmohan Singh, and Rajendra Pamula, "Design of Cognitive Engine for Cognitive Radio Network using MOGA", 4th Int'l Conf. on Recent Advances in Information Technology, RAIT-2018, DOI: 10.1109/RAIT.2018.8389072.
8. Shuminoski T., Gavrilovska L., Janevski T. "QoS Performances of Heterogeneous Networks with multiple Radio Access Technologies", *IEEE EUROCON 2017*, 6–8 JULY 2017, DOI: 10.1109/EUROCON.2017.8011091.
9. Laura Pierucci. "The quality of experience perspective toward 5G technology", *IEEE Wireless Communications*, August 2015, DOI: 10.1109/MWC.2015.7224722.
10. Kyryk M., Pleskanka N., Yanyshyn V. Performance evaluation model for spectrum decision methods in cognitive radio, 2017 *IEEE*. DOI:10.1109/CADSM.2017.7916137
11. Subitha D., Mathana J.M. 2018, 'Design of Low Complexity Hybrid Precoder and Inkjet Printed Antenna Array for Massive MIMO Downlink Systems', *International Journal of Antennas and Propagation*, ISSN: 1687-5869, DOI:10.1155/2018/4315128
12. Subitha D., Mathana J.M. A Novel Low Complexity Downlink linear precoding Algorithm for Massive MIMO Systems', *Springer, Journal of Cluster Computing*, 2018. ISSN: 1386–7857. DOI: 10.1007/s10586-018-2050-1

Mikhnenko Ya. O. ANALYSIS OF WAYS TO IMPROVE THE QUALITY OF SERVICES FOR A MULTI-USER ENVIRONMENT IN A COGNITIVE RADIO NETWORK

This study investigates the application of Cognitive Radio Technology (CRT) for optimizing the use of the limited radio frequency spectrum and ensuring high Quality of Service (QoS) in a multi-user environment. With the rapid development of the mobile industry and the growing number of mobile device users, effective spectrum resource management has become a key task for network operators, allowing them to avoid network congestion, reduce delays, and prevent data loss. To address this challenge, two novel approaches have been proposed: Localizability Aided Localization (LAL) and the Water Filling method.

Within the framework of this study, a comparative analysis of classical routing protocols – AOMDV (Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing), and AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) – has been conducted. To implement the proposed methods, the baseline AODV protocol was extended with AOMDV and DSR algorithms, enabling the integration of LAL and Water Filling, respectively. The developed solutions are aimed at optimizing routing and achieving efficient power allocation across channels, which is critically important in cognitive radio networks with the presence of primary users (PU) and secondary users (SU).

The modeling was carried out using the Network Simulator 2 (NS-2) tool, and performance evaluation was conducted based on three key metrics: throughput, Packet Delivery Ratio (PDR), and delay. The experimental

results showed that the LAL method, implemented on top of the AOMDV protocol, provides higher throughput and minimal delay, while the Water Filling method, integrated with DSR, demonstrates better PDR performance. In turn, the traditional AODV algorithm lags behind both enhanced solutions across all selected parameters.

Thus, the study demonstrates that the proposed methods can significantly enhance the Quality of Service (QoS) for users in cognitive radio networks. The implementation of LAL and Water Filling not only enables more efficient utilization of spectral resources but also provides a foundation for future integration into next-generation systems, where QoS and QoE requirements will become even more critical. The obtained results may be useful for routing protocol developers, mobile network operators, and researchers in the field of wireless communications.

Key words: *cognitive radio networks, quality of service, routing, performance evaluation.*

Дата надходження статті: 07.09.2025

Дата прийняття статті: 25.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Романов О.І.

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

Нестеренко М.М.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Марінов А.І.

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

МОДИФІКОВАНИЙ БАГАТОШЛЯХОВИЙ МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В SDN МЕРЕЖАХ ДАТА-ЦЕНТРІВ

Стаття присвячена дослідженню та вдосконаленню методу балансування навантаження у програмно-конфігурованих мережах (SDN) дата-центрів. Актуальність проблеми обумовлена необхідністю ефективного використання наявних мережевих ресурсів та забезпечення високих показників якості обслуговування (QoS) в умовах динамічного середовища центрів обробки даних. Сучасний розвиток мереж SDN обумовлює широке застосування даної технології для розгортання мережевої інфраструктури центрів обробки даних. Вирішення цієї проблеми досягається використанням методів інжинірингу трафіку (TE), які дозволяють підвищити продуктивність мережі та якість обслуговування за рахунок багатошляхової маршрутизації в поєднанні з класифікацією та пріоритезацією трафіка. Застосування TE також спрямоване на зниження витрат на експлуатацію та запобігання появи перевантажених сегментів в мережі. У статті проведено аналіз і порівняння існуючих технологій та інженерних рішень для оптимізації мережевих ресурсів, зокрема B4 (Google), Hedera, DevoFlow, Mahout, MiceTrap та MSDN-TE. Розглянуто підходи (Hedera, DevoFlow, Mahout, MiceTrap), які використовують класифікацію потоків на великі “elephant-flows” та малі “mice-flows” з метою розвантаження централізованого SDN-контролера та підвищення ефективності обслуговування, а також MSDN-TE, який використовує багатошляхову маршрутизацію у поєднанні з алгоритмом Еппштейна, який обраховує найменш завантажений шлях, мінімізуючи затримки та втрати пакетів шляхом обчислення ваги кожного шляху передачі на основі певних мережевих метрик. У даній роботі запропоновано модифікований метод балансування навантаження на основі алгоритму Еппштейна. Вдосконалення полягає у можливості одночасного використання декількох рівнозначних шляхів передачі для трафіку реального часу між джерелом і отримувачем. Цей підхід застосовується, коли пропускної спроможності основного шляху недостатньо для забезпечення необхідних показників QoS (Delay, Packet Loss, Jitter). З метою підтвердження ефективності, було розгорнуто віртуальний сегмент SDN мережі дата-центру (за допомогою ONOS та Mininet). Результати дослідження підтверджують, що динамічне балансування навантаження, яке спирається на відсоток завантаження шляхів передачі у реальний час, є ефективним рішенням для підвищення показників QoS, нівелювання утворення перевантажених сегментів (bottlenecks) та забезпечення надійності передачі трафіку в SDN мережах дата-центрів.

Ключові слова: програмно-конфігуровані мережі (SDN), дата-центри, якість обслуговування (QoS), інжиніринг трафіку (TE), передача трафіку, балансування навантаження в мережі, OpenFlow, багатошляхова маршрутизація.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток мереж SDN вказує на широке застосування даної технології для розгортання мережевої інфраструктури розподілених центрів обробки даних (Data Center). При чому динамічна природа додатків та сервісів, а також різноманітність технологій тран-

спортних мереж вимагають впровадження додаткових механізмів, що дозволяють ефективно використовувати наявні мережеві ресурси та забезпечувати необхідні показники якості обслуговування QoS.

Одним із способів вирішення даної проблеми є використання методів traffic engineering (TE), які

дозволяють здійснювати балансування навантаження в рамках всієї мережі за рахунок використання багатошляхової маршрутизації в поєднанні з класифікацією та пріоритезацією трафіка, що стало можливим при централізації управління в мережах SDN. Іншими словами, TE дозволяє підвищити продуктивність мережі та якість обслуговування (QoS) [1, с. 4377–4393] користувачів за рахунок ефективного та раціонального використання наявних ресурсів [2, с. 33–40]. Застосування методів “інжинірингу трафіку” також може знизити витрати на експлуатацію та запобігти утворенню перевантажених сегментів (bottlenecks) в мережі.

На даний час існує велика кількість підходів, методів та реалізацій різних технологій для оптимізації мережевих ресурсів з метою досягти належного значення показників якості обслуговування. Тому варто спочатку провести аналіз та порівняння існуючих технологій та архітектурних рішень таких як: B4, Hedera, DevoFlow [3, с. 254–265], Mahout [4, с. 1629–1637], MiceTrap для визначення принципів роботи методів балансування в дата-центрах та мережах SDN. В подальшому в даній статті запропонований модифікований метод балансування на основі протоколу багатошляхової маршрутизації за рахунок одночасного використання декількох рівнозначних шляхів передачі між джерелом і отримувачем повідомлень (Source-Destination).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо основні технології, моделі, та протоколи, які використовуються для балансування трафіка в Software Defined WAN (SD WAN) та мережах дата-центрів:

B4 (ЕСМР на основі хешування) являє собою практичне рішення від компанії Google, що дозво-

ляє з'єднувати дата-центри компанії по всьому світу між собою. B4 була створена для вирішення проблем у глобальній мережі (WAN), таких як: надійність, системні відмови та продуктивність мережі. Основна ідея полягає в розподілі пропускнуої спроможності між сервісами, що між собою конкурують за рахунок динамічної зміни структури трафіку з метою запобігання збоїв/відмов у інфраструктурі (мережі) дата-центрів. Також B4 розроблявся задля підтримки та швидкого розгортання (впровадження) нових або стандартних протоколів, функцій керування мережею, трафіком. Однією із імплементованих функцій є механізм “інжинірингу трафіку”, який дозволяє додаткам гнучко і швидко адаптуватися відповідно до поточного стану мережі, або у разі виникнення аварійних ситуацій.

Важливо, що така архітектура використовує маршрутизацію та “інжиніринг трафіку” як окремі сервіси, а методи TE розміщуються над протоколами маршрутизації. Це дозволяє системі управління мережею використовувати стратегію „повернення до базових протоколів маршрутизації”, адже довгострокові відмови в глобальних мережах можуть призвести до величезних збитків. Тобто, якщо служба TE зазнає збоїв в роботі, то в подальшому пакети в мережі пересилаються за допомогою класичних протоколів із визначенням найкоротших шляхів.

На рис. 1. Представлено трирівневу архітектуру відповідно до підходу B4.

Зображена вище архітектура B4 з інтеграцією методів TE складається з наступних логічних рівнів:

– глобальний рівень, дозволяє централізовано керувати всією глобальною мережею за допомо-

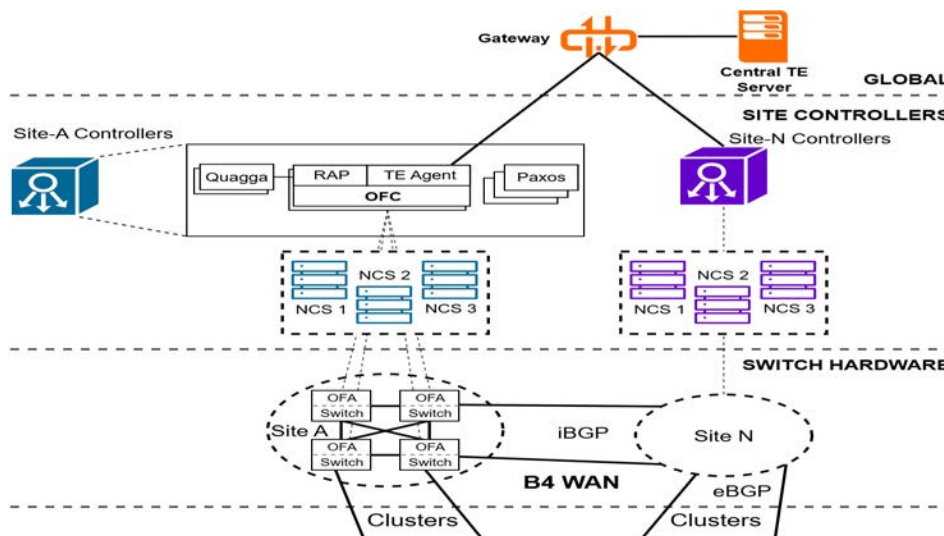


Рис. 1. Архітектура B4 (Google)

гою централізованих додатків, таких як центральний сервер керування трафіком Central TE Server (СТЕ) та Gateway (шлюз SDN), який дозволяє централізовано керувати мережею (міст між СТЕ та рівнем нижче);

- рівень контролера області відповідальності (site controllers), який включає контролер OpenFlow і додатки для управління мережею, такі як сервіси маршрутизації;

- комутаційний апаратний рівень (switch hardware), що включає комутатори та на якому виконується переадресація трафіку.

ТЕ Server виконує центральну і головну роль у керуванні трафіком. Він є логічно централізованим додатком у глобальному шарі архітектури В4. Його метою є розподіл пропускну здатності між додатками у межах компанії, при можливості застосовуючи кілька шляхів передачі, аби забезпечити належне виконання функції справедливого розподілу max-min (Min-Max fairness). ТЕ Server оперує інформацією про мережеву топологію, Flow Groups (групами потоків), Tunnels (тунелями) та Tunnel Groups (групами тунелів). Також ТЕ Server генерує Tunnel Groups, Tunnels та Flow Groups, які потім передаються до SDN Gateway, а звідти до контролеру для встановлення політик/правил на комутаторах.

Описана вище архітектура працює за наступним принципом. На найвищому рівні знаходиться СТЕ, який відповідає за: визначення незадіяної пропускну спроможності у мережі для багатшляхової маршрутизації; розподіл і коригування потреб у необхідних ресурсах між сервісами; динамічне перенаправлення трафіку з несправних каналів зв'язку або комутаторів. Gateway SDN надає загальну картину топології мережі для СТЕ. СТЕ використовує це загальне представлення мережі для обчислення агрегованого трафіку на межі між зонами відповідальності (site controllers). Потім абстрактний результат обчислень подається алгоритму оптимізації ТЕ задля рівномірного розподілу ресурсів між групами додатків/сервісів.

Для досягнення рівномірного розподілу мережових та апаратних ресурсів, використовується алгоритм Min-Max „справедливого розподілу” (Min-Max Fairness). На основі наданих пріоритетів сервісам, алгоритм оптимізації ТЕ і розподіляє відповідно пропускну спроможність між ними.

Основними принципами Min-Max Fairness є:

- рівномірний розподіл: усі потоки отримують рівну частку ресурсу, доки хоча б один із них не досягає своєї максимально допустимої потреби.

- пріоритет найменш забезпечених: якщо деякі потоки вже досягли своїх меж (отримали

свою мінімально необхідну пропускну спроможність), доступний ресурс перерозподіляється серед тих потоків, кому його ще не вистачає.

- гарантований мінімум: потоки отримують рівний розподіл ресурсів (наприклад: доступну пропускну спроможність) до тих пір, поки конкуруючі потоки не отримують обмеження, після чого інші зможуть отримати більше ресурсів.

Така взаємодія відбувається на відповідних рівнях в архітектурі В4. Адже Max-Min Fairness являється свого роду стратегією централізованої системи ТЕ, яка визначає ідеальний або оптимальний розподіл трафіку між різними шляхами передачі. В свою чергу протокол ECMP – це механізм на рівні апаратного забезпечення комутаторів, який дозволяє реалізує цей розподіл, фізично хешуючи пакети та надсилаючи їх через обрані тунелі або лінки відповідно до встановлених ТЕ коефіцієнтів.

Досягнення справедливого розподілу смуги пропускання між додатками/службами означає максимізацію використання смуги пропускання, не знижуючи при цьому справедливої частки смуги пропускання для всіх програм у системі.

В даній стратегії задіється централізований алгоритм оптимізації ТЕ, який, в свою чергу, визначає як розподілити смугу пропускання між групами потоків (Flow Groups, FG) за допомогою функцій смуги пропускання, пріоритезуючи їх на „вузьких місцях” мережі. Результатом цього алгоритму є створення тунельних груп (Tunnel Groups, TG), які зіставляють FG з набором тунелів та відповідними вагами. Вага визначає частку трафіку FG, яка має бути перенаправлена по кожному тунелю. Це дозволяє врахувати обмеження обладнання при реалізації справедливого розподілу Max-Min.

Вже на етапі пересилання пакетів комутатором починає застосовуватись ECMP. Тобто, коли сервер ТЕ визначив бажані тунельні групи та їхні коефіцієнти розподілу, він надсилає ці інструкції до OpenFlow контролерів (OFCs), які потім надають відповідні інструкції на підпорядковані комутатори за допомогою OpenFlow.

А саме, комутатори в В4 використовують хешування ECMP для розподілу потоків між тунелями в межах одного міжсайтового (всередині одного Site) з'єднання. Тобто на третьому рівні архітектури В4, для балансування навантаження між декількома шляхами використовується протокол Equal-Cost Multi-Path (ECMP) на основі хешування, це дозволяє мережі адаптувати пропускну спроможність на користь ефективного викорис-

тання доступних шляхів (з однаковою вартістю) між вузлами без перевантаження одного з них, що в разі зменшує ймовірність перевантаження каналів зв'язку і призводить до зменшення затримок при передачі трафіку.

В свою чергу, хеш-функція у ECMP відповідає за передачу усіх пакетів одного потоку через однаковий маршрут, що запобігає проблемі зі змішуванням пакетів. Порядок хешування являє собою дописування на комутаторах відповідних міток до заголовків вхідних пакетів, та присвоєння однакового шляху для передачі усіх пакетів потоку (розуміються усі пакети, які мають спільні поля/заголовки, наприклад однакову адресу отримувача чи відправника).

Таким чином рішення B4 від Google має на меті підтримувати на належному рівні роботу усіх сервісів компанії. За рахунок наявності повної інформації про всю топологію мережі між дата-центрами, системи балансування можуть миттєво коригувати виділення пропускнуєї спроможності на різних ділянках усієї WAN мережі для активних сервісів, враховуючи поточний стан мережних сегментів/каналів зв'язку та функціонуючого навантаження [5, с. 1050-1064]. Це дозволяє забезпечити високий рівень QoS як для кінцевих користувачів, так і для відповідних службових сервісів між дата-центрами всередині компанії.

Необхідно відмітити, що є ряд технологій та рішень (Hedera, DevoFlow, Mahout, MiceTrap), які полягають в розбитті (класифікації) потоків на великі „elephant-flows” та малі „mice-flows” та використання методів TE в процесі обслуговування більш пріоритетних потоків. Це було зроблено з метою розвантажити централізований

SDN-контролер (OpenFlow Controller) та перекласти деякі функції обслуговування потоків на мережеве обладнання.

Розглянемо особливості роботи вище приведених технологій. Відповідно до концепції Hedera (рис. 2) розпізнавання великих та малих потоків (elephant/mice flows) відбувається на граничних комутаторах (edge-switches) до яких безпосередньо підключені клієнти (або сервери) та здійснюється розподіл потоків для подальшого обслуговування. А саме, або передати обслуговування потоку на контролер, або самостійно виконати передачу потоку (пакету). Тобто здійснюється певна модифікація моделі OpenFlow за рахунок повернення часткової відповідальності за прийняття рішення передачі на комутатори.

Принцип розпізнавання полягає у встановленні так званого граничного (порогового) значення (threshold), яке по замовчуванню становить 10% від максимальної бітової швидкості каналу зв'язку з сервером (наприклад, якщо канал підтримує 1 Гбіт/с, то threshold буде 100 Мбіт/с). Якщо величина потоку буде більше порогового значення, то потік маркуватиметься як великий „elephant-flows” та буде передано комутатором на централізований SDN-контролер. В свою чергу контролер, прорахує оптимальні (найменш навантажені та найкоротші) шляхи передачі для даного потоку, після чого контролер також надішле правила передачі для даного потоку на всі підпорядковані комутатори, які входять до визначеного шляху передачі. Потоки, які не перевищили threshold, не маркуються, але вважаються малими „mice-flows” і передаються без участі контролера. Це означає, що комутатори самостійно приймають

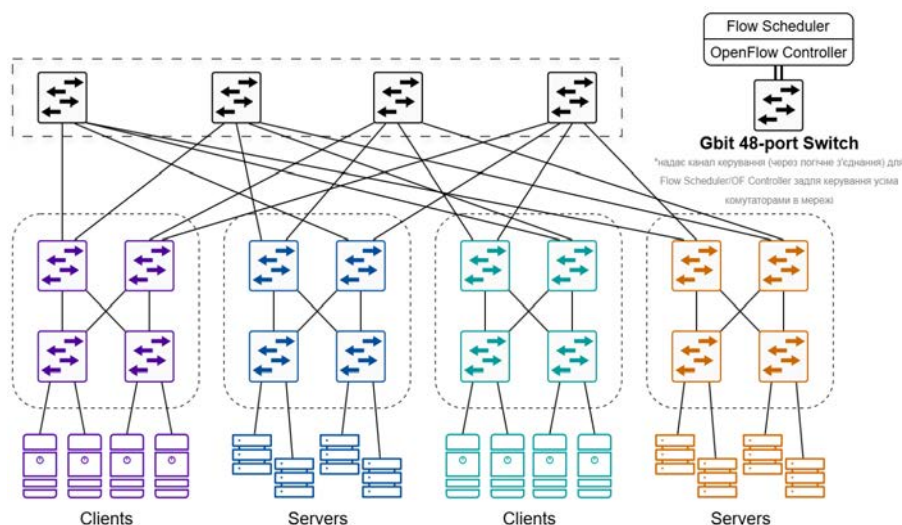


Рис. 2. Архітектура Hedera мережі дата-центру

рішення щодо маршрутизації трафіку, орієнтовані на “вартість” шляхів передачі. Якщо існують шляхи з однаковою вартістю (equal-cost paths), трафік рівномірно розподіляється між ними.

Однак, в підходах з методами балансування навантаження, таких як DevoFlow та Hedera з’ясували, що виявлення та подальше маркування потоків досягають високих накладних витрат ресурсів, які споживають суттєву частину апаратних та мережевих ресурсів [6].

Тому в подальшому було розроблено підхід Mahout, який став своєрідним подальшим напрямком вирішення проблем розвантаження SDN-контролеру та елементів інфраструктури щодо класифікації потоків за їх об’ємом.

У Mahout виявлення великих потоків „elephant-flows” відбувається за рахунок модифікації кінцевих хостів (end-hosts). А саме, в роботі end-hosts впроваджується проміжний рівень (shim layer), який інтегрований в операційну систему для класифікації потоків. Цей проміжний рівень стежить за буфером TCP-сокета та позначає потоки великими, коли відбувається перевищення порогу швидкості в зазначеному буфері. Таким чином, підхід Mahout значно зменшує навантаження на комутатори та SDN контролер, тому що: не потрібно зберігати інформацію про всі потоки у TCAM; немає необхідності запитувати контролер про статус потоків. Це призводить до того, що в цілому зменшується навантаження на мережу, оскільки виявлення потоків виконується на рівні кінцевих пристроїв (хостів). Mahout використовує механізм внутрішньо-смугової сигналізації для позначення потоків як „elephant-flows” та інформування контролера про такі потоки. Для обчислення оптимальних шляхів контролер збирає статистику про „elephant-flows” та інформацію про завантаження каналів з комутаторів, аби вибрати та призначити найменш перевантажений шлях.

Mahout використовує ECMP для маршрутизації звичайного трафіку. Цей метод може виявляти elephant-flows швидше, з меншими витратами на апаратні ресурси, ніж інші методи. Але він вимагає модифікації кінцевих хостів.

Також досить цікавим підходом являється MiceTrap, який орієнтований на оптимізацію передачі та балансування „mice-flows” у мережах дата-центрів. Це пов’язано з тим що, „mice-flows” іноді можуть становити до 90% усіх потоків дата-центру, що значно впливатиме на продуктивність всієї мережі дата-центру. В такому випадку застосування рішень TE лише для „elephant-flows” 10% від усіх потоків дата-центру просто не є доцільним [7, с. 683-688].

MiceTrap забезпечує масштабованість шляхом агрегації „mice-flows” та використовує програмно-конфігурований алгоритм зваженої маршрутизації, що дозволяє динамічно і під поточне навантаження в мережі балансувати навантаження для „mice-flows”.

Основні компоненти мережі на базі MiceTrap зображено на рис. 3.

На рисунку переставному вище видно, що MiceTrap активно взаємодіє з усіма компонентами SDN мережі, та налаштовує на них механізми для більш збалансованої роботи, а саме:

- на кінцевих серверах (хостах) розгорнуто модулі виявлення „elephant-flows”;
- на OpenFlow-комутаторах розгорнуто модуль агрегації малих потоків на базі стандартних технологій OpenFlow (таблиці потоків, групові таблиці потоків);
- на MiceTrap SDN контролері розгорнуто модулі управління які використовуються для: побудови абстрактної структури (топології) всієї мережі; збору статистики по мережі; розрахунку “вартості” усіх шляхів передачі в мережі; розрахунку шляхів для потоків „mice-flows”.

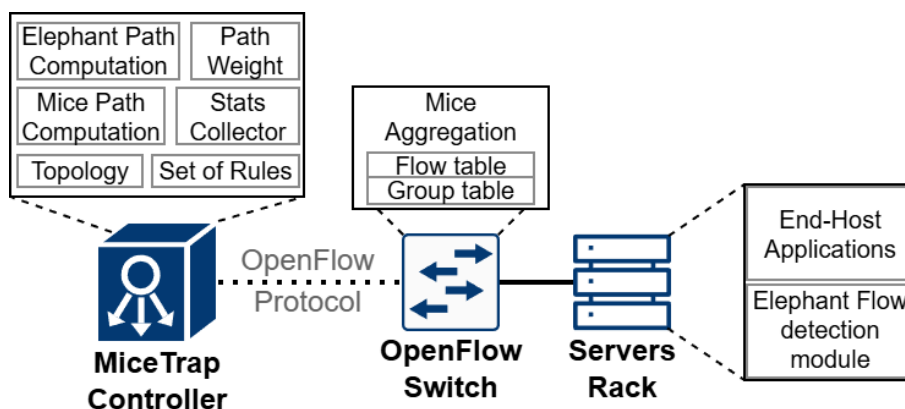


Рис. 3. Архітектура MiceTrap у межах мережі дата-центру

Хоча MiceTrap займається по більшій частині передачею „mice-flows”, йому також необхідний алгоритм розпізнавання потоків та окремий механізм для обслуговування „elephant-flows”. Тому, для виявлення та маркування великих потоків, MiceTrap (також як у Mahout) на кінцевому хості (сервері) використовує інтегрований shim layer на рівні ядра операційної системи. Shim layer контролює буфери TCP-сокетів, ідентифікує та позначає потік як “elephant-flow”, коли кількість байт у буфері перевищує заздалегідь визначений поріг швидкості за певний проміжок часу.

Після виявлення “elephant-flow” визначається по замовчуванню режим передачі наступних ідентичних пакетів потоку (наприклад, з використанням OpenFlow записів в таблицях потоків на комутаторах зі спеціальними символами та багатошляхової маршрутизації ESMR).

Оскільки MiceTrap наголошує на тому, що більша частина трафіку мережі дата-центру може складатися з малих потоків, тому й було застосовано модуль Mice Aggregation (на комутаторі), котрий об'єднує вхідні малі потоки (усі потоки, які не були промарковані як великі) за якоюсь спільною ознакою (наприклад, конкретною IP-адресою отримувача або стійкою призначення).

Таким чином кількість правил, необхідних для передачі малих потоків зі спільною ознакою, суттєво зменшується. Це все фактично досягається за рахунок використання лише функцій, що надаються стандартом OF (OpenFlow). Під цим розуміється: використання групових таблиць (group tables) у поєднанні із таблицями потоків (flow tables) для підтримки багатошляхової маршрутизації (multi-path routing).

Багатошляхова маршрутизація реалізується за рахунок призначення потоку до певної групи (за певною ознакою). Кожна група складається з “бакетів” (group action buckets), причому кожен бакет містить набір дій, які застосовуються до відповідних потоків, тобто кожен бакет відповідає конкретному маршруту, яким потік може дістатися до місця призначення. А також, кожен бакет має власний параметр ваги (weight field), що визначає його частку в загальному трафіку, що обробляється групою.

Необхідно відмітити, що багатошляхова маршрутизація на базі ESMR розподіляє трафік рівно навпіл і шукає лише можливість виконати такий розподіл (шукає на кожному комутаторі декілька рівноцінних шляхів доставки до отримувача). В ESMR враховується також вага кожного маршруту передачі, така вага зазвичай розраховується

з урахуванням кількості стрибків (хопів) між комутаторами та заданої пропускної здатності каналів. Тобто поточний стан мережі (навантаження каналів, затримки) не враховано в даному концепті маршрутизації, через це можуть з'являтися сегменти мережі, де буде перевантаження каналів.

Відповідно у підході MiceTrap на базі ESMR впровадили власний алгоритм зваженої маршрутизації, який дозволяє у режимі реального часу розподіляти навантаження між шляхами передачі, враховуючи поточне завантаження каналів зв'язку. Це дає змогу при передачі mice flows більш оптимально використовувати ресурси мережі дата-центру, за рахунок визначення функціонуючого навантаження та стану мережі.

Також MiceTrap, пропонує встановлювати правила що відповідають спільній адресі призначення, оскільки модель трафіку “багато до одного” досить поширена в дата-центрах. Наприклад, якщо 1000 малих потоків надходять на комутатор Top of Rack (ToR), які потім будуть доставлятися на одну й ту саму адресу призначення, тоді контролеру варто встановити лише одне правило, що відповідає адресі призначення, замість створення окремого правила для кожного потоку.

Ще одним оригінальним рішенням для балансування навантаження є Multipath Software-Defined Networking Traffic Engineering (MSDN-TE) [8, с. 630–639], який також використовує багатошляхову маршрутизацію для оптимального використання мережевих ресурсів та підвищення продуктивності мережі.

Якщо розглядати принцип роботи MSDN-TE, то основна архітектура підходу зображена на рис. 4.

Спочатку відбувається збір статистики та передача її на контролер для цього призначений модуль моніторингу MONFUN (рис. 4). Даний модуль отримує необхідні статистичні дані такі як топологія мережі, статистика потоків, використання каналів, а також коефіцієнт втрати пакетів (Packet Loss Ratio) та час затримки пакетів (Packet Delay). MONFUN надає інформацію про потоки та їх шляхи передачі. Також збирається інформація скільки трафіку генерує кожен хост у мережі. При чому, частота оновлення метрик шляхів передачі та оновлення топології мережі знаходиться в діапазоні 10-15 секунд і залежить від здатності контролера збирати цю інформацію з комутаторів.

В результаті обробки статистичних даних отримуються наступні синтетичні параметри мережі: Link Load – середнє значення навантаження кожного каналу за певний період часу; Average Network Load – середнє значення навантаження

всіх каналів мережі; Total Network Dropped – кількість всіх втрачених пакетів в мережі.

Оброблені дані надходять на наступний модуль TE Algorithm, який прораховує навантаження в мережі, перебудовує маршрути в мережі при використанні алгоритму Еппштейна, створює нові правила про призначення потоків на визначені шляхи передачі. Усі оновлені (або нові) правила обробки потоків передаються на модуль керування ACTFUN.

ACTFUN залучається задля внесення змін (політик передачі) на площині передачі (data plane, оновлення таблиць потоків на комутаторах). Контролер може динамічно налаштовувати діючі параметри (path_ID та flow_ID) для визначення потоків оптимальних шляхів передачі.

Якщо більш детально, то MSDN-TE використовує підхід SDN із залученням алгоритму Еппштейна. Підхід базується на використанні декількох шляхів для пересилання потоків з урахуванням поточного значення навантаження шляхів в момент передачі. При прийнятті рішення про пересилання потоку, здійснюється обчислення k-шляхів найкоротших для пересилання потоків між будь-якою парою Source-Destination (S-D), а потім здійснюється вибір найменш завантаженого шляху для передачі потоку. Тобто, алгоритм Еппштейна собою являє метод оптимізації розподілу мережеских ресурсів, за яким трафік розподілятиметься між доступними шляхами таким чином, аби мінімізувати затримки та втрати пакетів.

Працює алгоритм Еппштейна наступним чином:

– спочатку відбувається збір мережеских метрик, де визначаються усі можливі шляхи передачі між джерелом і призначенням (S-D), а також збираються дані про мережескі параметри: затримки, поточне завантаження каналів зв'язку;

– після чого відбувається обчислення ваги кожного шляху з урахуванням багатьох мережеских параметрів за допомогою наступного виразу:

$$W(P) = \alpha \times \text{delay} + \beta \times \text{loss} + \gamma \times \text{utilization}, \quad (1)$$

де: delay – затримка; loss – втрата пакетів; utilization – завантаження каналу; коефіцієнти α , β , γ і визначають вагу (weigh) кожного параметру з аналітичного виразу (1);

– далі йде вибір найбільш оптимального шляху передачі потоку за найменшим значенням $W(P)$.

– останнім кроком є процес динамічного коригування, де при зміні мережеского стану (збільшенні завантаженості, відмові каналів зв'язку) алгоритм перераховує параметр ваги шляху ($W(P)$) та адаптує маршрутизацію під поточний стан мережі.

Використання MSDN-TE в поєднанні з алгоритмом Еппштейна має суттєві переваги в порівнянні з протоколом багатошляхової маршрутизації ECMP, однак у випадку рівнозначних шляхів передачі не дозволяє одночасно їх використовувати при перенавантаженні.

Формулювання цілей статті. Тому в дані статті пропонується модифікація підходу MSDN-TE, а саме при передачі трафіку реального часу між Source-Destination, що матимуть рівнозначні шляхи одночасно використовувати декілька шляхів передачі з урахуванням показників якості обслуговування QoS (Delay, Packet Loss, Jitter).

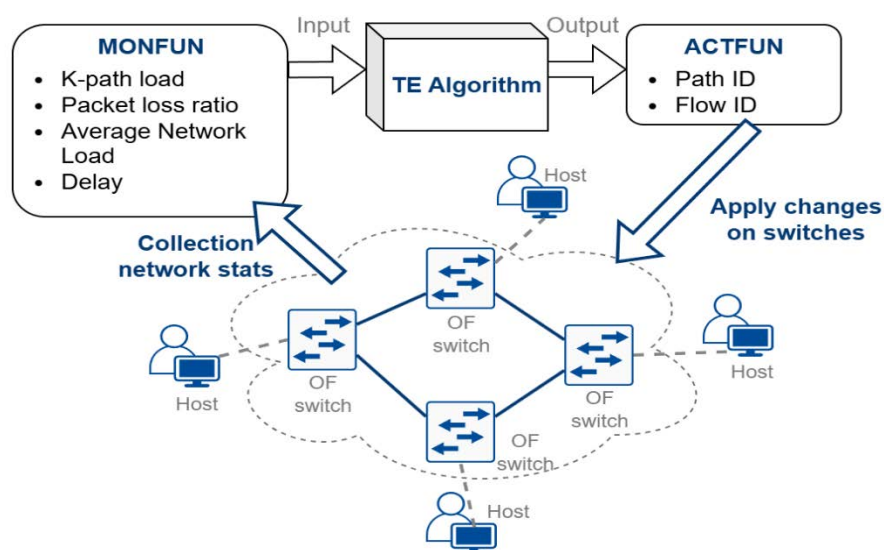


Рис. 4. Архітектура MSDN-TE

Тобто, на етапі динамічного розподілу (балансування) навантаження, коли пропускної основною шляху спроможності не вистачає щоб забезпечити задані показники QoS, то надлишкові потоки трафіку реального часу передавати по альтернативному рівноцінному шляху передачі.

Виклад основного матеріалу. З метою підтвердження запропонованих рішень та проведення експериментів був розгорнутий віртуальний сегмент SDN мережі дата-центру, при використанні розподіленого контролеру ONOS та Mininet для емуляції необхідної топології мережі.

Візуалізація топології SDN мережі на контролері ONOS, яка використовувалась у експериментах, зображено на рис 5.

Для експерименту було використано кластер з трьох ONOS контролерів, які в подальшому (при запуску мережі) взаємодіють через Mininet з віртуальними комутаторами OpenFlow virtual Switch (OvS). Відповідно до комутаторів під'єднані хости (сервери), які генерують UDP-потоки за допомогою утиліти iPerf. Топологія мережі з її елементами, бітовою швидкістю каналів, прописувалася у вигляді програми на мові програму-

вання Python, яка запускається через платформу-емулятор Mininet.

Комутатори (OvS) на схемі віртуального макету підсвічуються різними кольорами, бо вони підпорядковуються різним контролерам з кластеру, що дає змогу рівномірно розподілити навантаження між контролерами без втрати продуктивності. Оскільки контролери в кластері синхронізуються між собою за допомогою Atomix Map, це дає змогу на кожному контролері мати однаково оновлені метрики про стан мережі рис. 6.

Вхідними даними для побудови топології (рис. 5) перед проведенням експериментів є:

10 OpenFlow virtual switches (віртуальні комутатори з підтримкою протоколу OpenFlow);

8 віртуальних хостів (які являють собою сервери у різних дата-центрах, кожен сервер має унікальну IP-адресу на кшталт 192.168.0.*);

3 ONOS-контролери (які об'єднані в кластер) рис. 6;

18 каналів зв'язку (links) в мережі між комутаторами з бітовою швидкістю 10 Мбіт/с кожен;

8 каналів зв'язку (links) між комутаторами та серверами (хостами) з бітовою швидкістю 10 Мбіт/с.

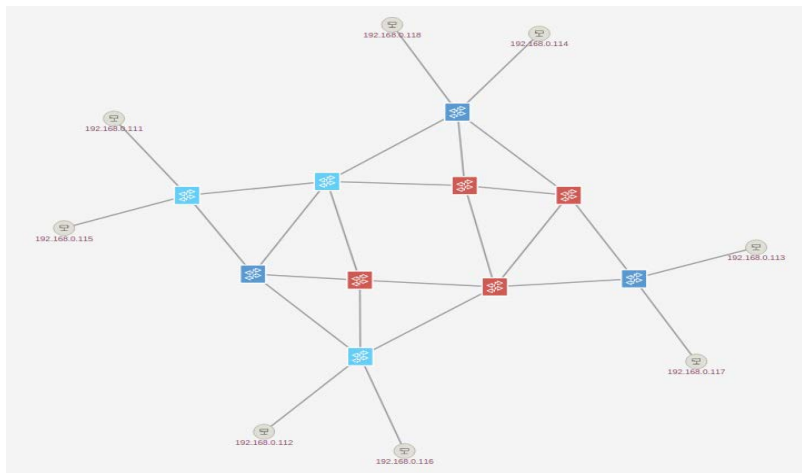


Рис. 5. Варіант топології SDN мережі дата-центрів

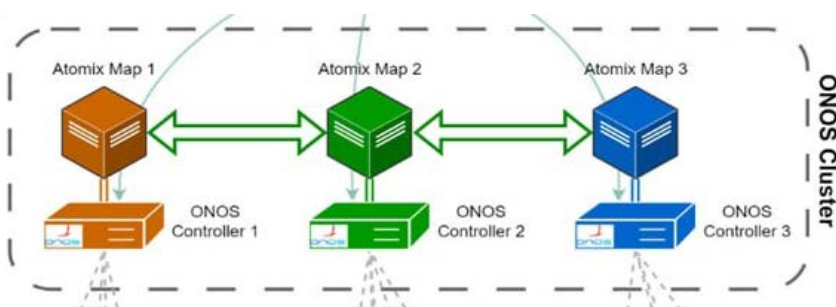


Рис. 6. Варіант архітектури ONOS кластеру

Для проведення експерименту були обрані найбільш віддалені сервери (згідно нижче приведеної топології SDN мережі на рис. 7), причому генерація UDP-потоків відбувалась у двох напрямках для емуляції роботи трафіка реального часу.

Результати моделювання для різних значень навантаження в кожному інформаційному напрямку (Information Direction, *ID*) та отримані значення мережевих параметрів зведені в таблицю 1. Під номером експерименту (табл. 1.) розуміється одночасна передача чотирьох UDP-сесій з однаковим значенням навантаження.

З таблиці 1 можемо побачити, що при сумарному навантаженні 8 Мбіт/с на два інформаційних напрямках, з'являються перші мінімальні втрати у мережі (2 втрачених на 142,861 доставлених пакетів). При подальшому збільшенні вхідного навантаження ситуація на мережі лише погіршується і відсоток втрат зростає. Так при навантаженні 10 Мбіт/с середній відсоток втрат пакетів в середньому складає 3,1%, а при навантаженні 12 Мбіт/с, що перевищує пропускну спроможність каналів у визначеному шляху мережі, середній відсоток втрат досягає 18%, що являється неприпустимо великим відсотком для трафіка реального часу. Також варто помітити, що коли навантаження досягло граничного значення нашої пропускну спроможності шляху передачі (10 Мбіт/с), тоді середній показник RTT набуває значення 1,9188 мілісекунд та затримки передачі пакетів також збільшується, що в подальшому також призведе до недотримання вимог щодо

QoS. При навантаженнях, які перевищують пропускну здатність каналів передачі, а саме: 11 та 12 Мбіт/с параметри затримки та RTT починають показувати занижені дані, бо мережа перевантажена і працює некоректно.

Більш того, при подальшому збільшенні сумарного вхідного навантаження (11, 12 Мбіт/с) відповідно до протоколів маршрутизації по замовчуванню спостерігались великі втрати пакетів (відмова лінії через перевантаження, див. рис. 8) та автоматично здійснювалось перенаштування резервного маршруту. Однак, перенаправлення трафіку на резервний шлях передачі не дало суттєвого ефекту та покращення показників якості обслуговування (втрати пакетів мали практично такі ж значення).

Тому наступним кроком стало використання модифікованого методу балансування навантаження на основі алгоритму Епштейна, а саме при додаванні кожної наступної сесії передачі контролери враховували всі допустимі рівнозначні шляхи передачі та рівномірно розподіляли потоки трафіку між ними та одночасно використовували декілька шляхів передачі. Принцип роботи удосконаленого методу балансування показано на рис. 9.

Після необхідних налаштувань при використанні модифікованого методу балансування була проведена серія експериментів, результати зведені в таблицю 2.

Аналіз результатів тестування (таблиця 2), згідно запропонованих удосконалень, вказують

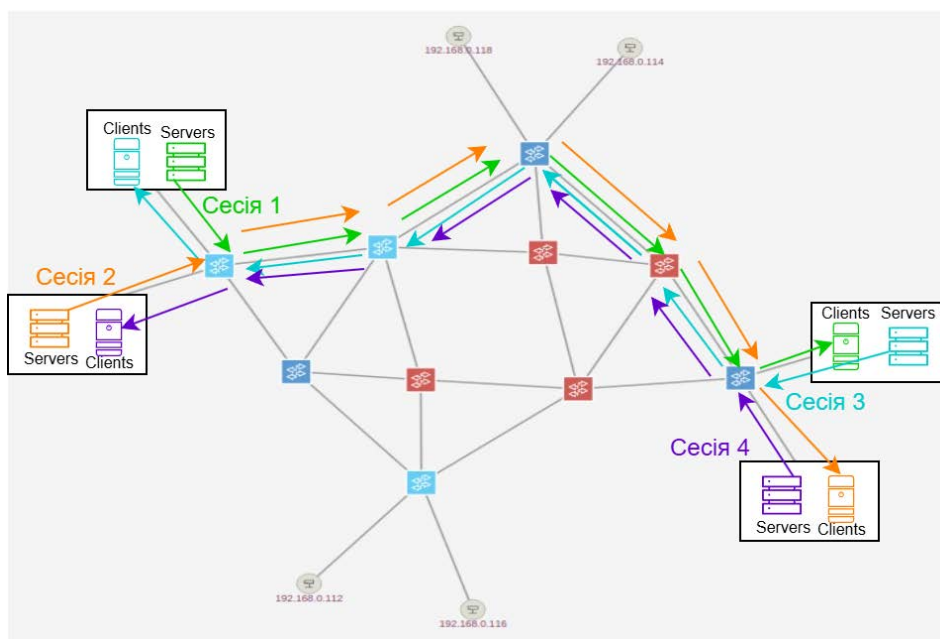


Рис. 7. Схема передачі трафіку до використання балансування навантаження

Таблиця 1

Статистичні дані після виконання першого експерименту

№ експер.	вхідне навантаження одного потоку, [Мбіт/с]	обслужене навантажен. за одну сесію, [Мбіт/с]	сумарне навантажен. в ID, [Мбіт/с]	середн. об'єм переданих даних за всі сесії, [Мбайт]	середн. затримка пакетів Delay, [мс]	середн. показник RTT за сесію, мс	середн. відсот. втрат пакетів Packet Loss, [%]
1	0,25	0,25	1	6,26	0,0341	0,0683	0,000
2	0,5	0,5	2	12,5	0,0310	0,0620	0,000
3	0,75	0,75	3	18,8	0,0116	0,0233	0,000
4	1	1	4	25	0,0185	0,0370	0,000
5	1,25	1,25	5	31,3	0,0198	0,0395	0,000
6	1,5	1,5	6	37,6	0,0128	0,0255	0,000
7	2	2	8	50,1	0,0816	0,1633	0,001
8	2,25	2,25	9	56,3	0,1525	0,3050	0,004
9	2,5	2,425	10	60,625	0,9594	1,9188	3,108
10	2,75	2,5075	11	63,125	0,8808	1,7615	8,275
11	3	2,45	12	61,6	0,7795	1,5590	18,075

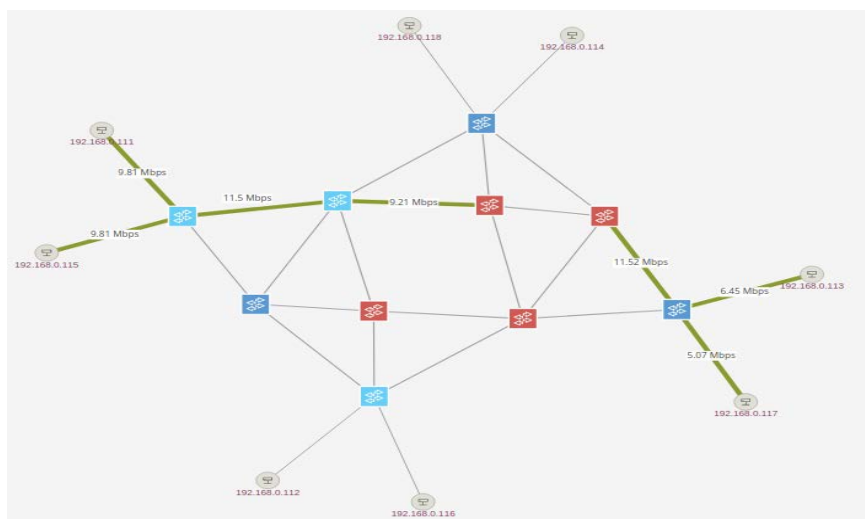


Рис. 8. Аварійна ситуація відмова лінії в SDN-мережі

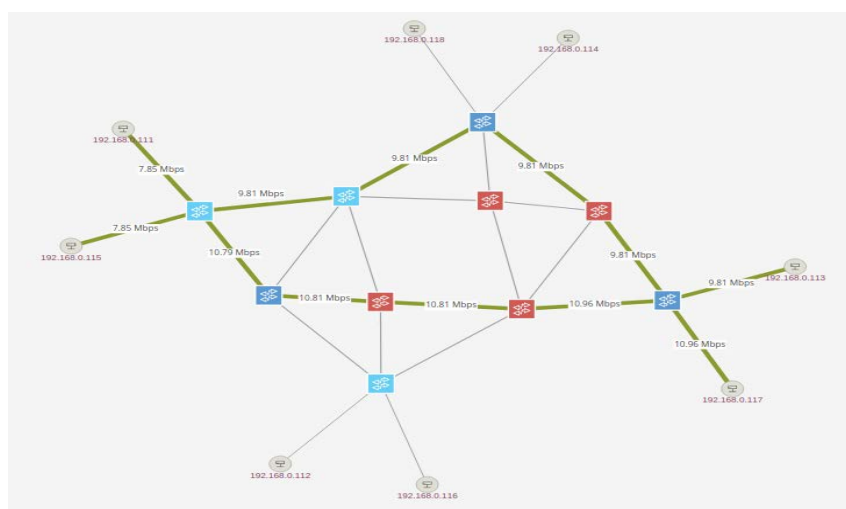


Рис. 9. Схема передачі трафіку при використанні балансування навантаження

Статистичні дані після виконання другого експерименту

№ експер.	вхідне навантаження одного потоку, [Мбіт/с]	обслужене навантажен. за одну сесію, [Мбіт/с]	сумарне навантажен. в ID, [Мбіт/с]	середн. об'єм переданих даних за всі сесії, [Мбайт]	середн. затримка пакетів Delay, [мс]	середн. показник RTT за сесію, мс	середн. відсот. втрат пакетів Packet Loss, [%]
1	2,25	2,25	9	56,3	0,0124	0,0248	0,001%
2	2,5	2,5	10	62,6	0,0118	0,0235	0,001%
3	2,75	2,75	11	68,9	0,0226	0,0453	0,000%
4	3	3	12	75,1	0,0080	0,0160	0,004%

на те, що за рахунок розподілу навантаження між рівнозначними шляхами передачі можна отримати допустимі значення показників QoS без зміни топології та збільшення бітової швидкості ліній передачі. Тобто при загальному навантаженні 10 Мбіт/с середній відсоток втрат пакетів складає лише 0,001% (в порівнянні з попередніми експериментами).

Графічне порівняння, на базі отриманих даних, об'єму переданих даних при першому (передача даних через 1 шлях) та другому експерименті (передача даних через 2 шляхи) зображено на рисунку 10.

З рисунку 10 видно, що під час першого експерименту, при досягненні пропускної здатності (10 Мбіт/с) кількість сумарно переданих даних починає знижуватися. В той час як під час другого експерименту об'єм переданих даних лишається на належному рівні, що свідчить про стабільність роботи мережі і відсутність втрат в каналах зв'язку.

Графічне порівняння, обслушеного навантаження за одну сесію при кожному експерименті зображено на рисунку 11.

З рисунку 11 видно, що під час першого експерименту, при досягненні пропускної здатності (10 Мбіт/с) реальне, або ж обслужене, навантаження, яке генерується при кожній сесії передачі (під час кожного експерименту виконувалася одночасна передача 4 сесій) почало знижуватися, через перевантаження в мережі. В той час як під час другого експерименту навантаження генерується в потрібному обсязі, без заниження, що вчергове свідчить про стабільність роботи мережі і відсутність втрат в каналах зв'язку. Таким чином ми вважаємо, що динамічне балансування одразу між декількома шляхами передачі являється ще одним ефективним рішенням для мереж дата центрів на рівні усіх розглянутих підходів та методів. А те, що балансування відбувається і обраховується з кожним новим надходячим потоком даних, тим самим спираючись на відсоток завантаження шляхів передачі у даний момент часу, дозволяє підвищити показників QoS у системі, та нівелювати утворення ситуацій “bottleneck” у мережі.

Висновки. Аналіз різних технологій та архітектур дата-центрів вказує на широке застосу-

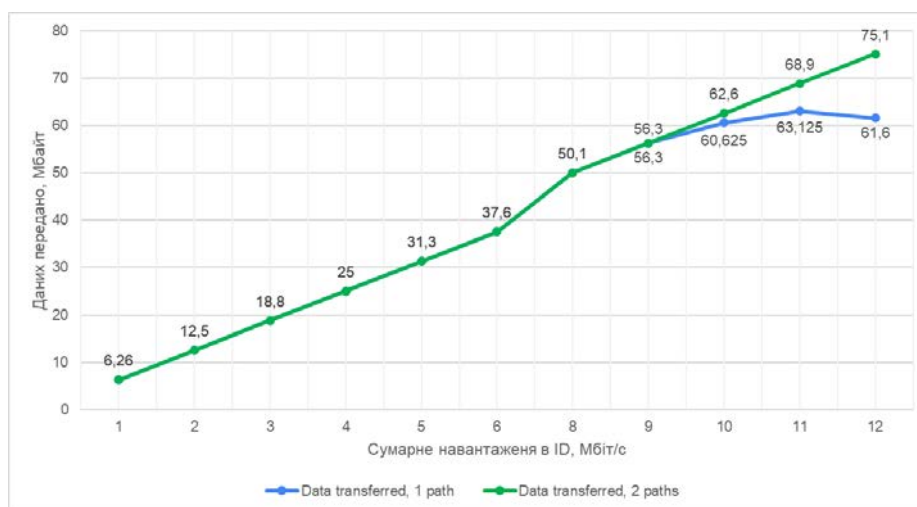


Рис. 10. Залежність сумарного навантаження від переданих даних двох експериментів

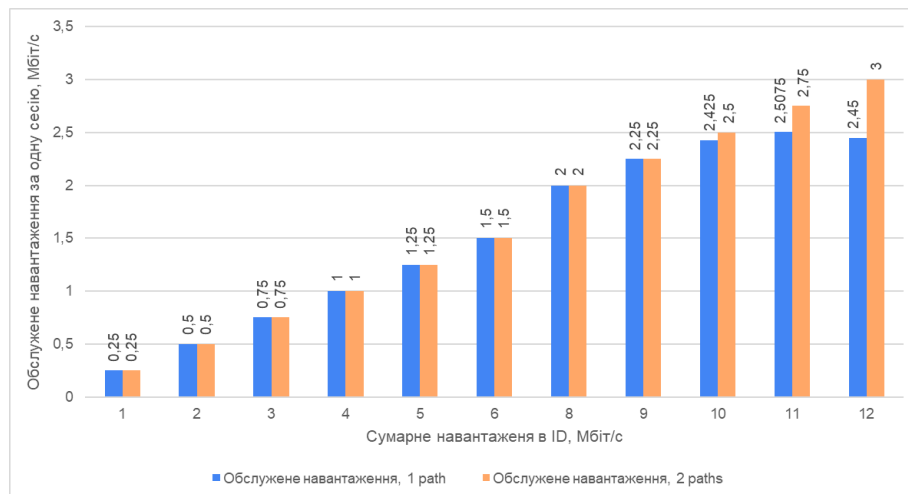


Рис. 11. Залежність сумарного навантаження від обслуженого навантаження двох експериментів

вання підходів SDN-мереж та методів „інжинірингу трафіка” для ефективного використання наявних ресурсів та забезпечення показників QoS в залежності від типу сервісів.

Розбиття трафіка на великі „elephant-flows” та малі „mice-flows” потоки (Hedera, DevoFlow, Mahout, MiceTrap) дозволяє визначити різні сценарії обслуговування та протоколи балансування навантаження з багатошляховою маршрутизацією.

В свою чергу, метод Multipath Software-Defined Networking Traffic Engineering з використанням

алгоритму Епштейна, дозволяє визначити більш оптимальний шлях передачі для кожного вхідного потоку з урахуванням більшої кількості мережевих параметрів ніж існуючий протокол багатошляхової передачі (ECMP).

В роботі представлено удосконалений метод балансування на основі алгоритму Епштейна, що дозволяє одночасно використовувати декілька шляхів передачі з дотриманням показників якості обслуговування QoS при передачі трафіка реального часу.

Список літератури:

1. Data Center Traffic Scheduling Strategy for Minimization Congestion and Quality of Service Guaranteeing / C. Wang et al. Computers, Materials & Continua. 2023. Vol. 75, no. 2. P. 4377–4393. URL: <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.037625>.
2. Mathematical Description of Control Problems in SDN Networks / Romanov O. et al. International Conference on Applied Innovations in IT (ICAIIIT). P. 33–40. URL: <http://dx.doi.org/10.25673/36582>.
3. Curtis A. R. et al. DevoFlow. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2011. Vol. 41, no. 4. P. 254–265. URL: <https://doi.org/10.1145/2043164.2018466>.
4. Curtis A. R., Kim W., Yalagandula P. Mahout: Low-overhead datacenter traffic management using end-host-based elephant detection. IEEE INFOCOM 2011 – IEEE Conference on Computer Communications, Shanghai, China. 2011. P. 1629–1637 URL: <https://doi.org/10.1109/infcom.2011.5934956>.
5. Dynamic Parallel Flow Algorithms with Centralized Scheduling for Load Balancing Improvement in Cloud Data Center Networks / W.-K. Chung et al. IEEE Transactions on Cloud Computing. 2021. P. 1050–1064. URL: <https://doi.org/10.1109/tcc.2021.3129768>.
6. Peterson L., Cascone C., Davie B. Software-Defined Networks: A Systems Approach. Systems Approach LLC, 2021.
7. Romanov O., Mankivskyi V. Optimal Traffic Distribution Based on the Sectoral Model of Loading Network Elements. 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine. 2019. P. 683–688 URL: <https://doi.org/10.1109/picst47496.2019.9061296>.
8. MSDN-TE: Multipath Based Traffic Engineering for SDN / K. T. Dinh et al. Intelligent Information and Database Systems. Berlin, Heidelberg, 2016. P. 630–639. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-49390-8_61.

Romanov O.I., Nesterenko M.M., Marinov A.I. MODIFIED MULTIPATH LOAD BALANCING METHOD IN SDN OF DATA CENTERS

The article is dedicated to the study and enhancement of load balancing methods in software-defined networks (SDN) of data centers. The relevance of this problem is driven by the need for efficient utilization of available network resources and the assurance of high Quality of Service (QoS) levels in the dynamic environment of cutting-edge data centers. The ongoing evolution of SDN architectures underlines the widespread adoption of this paradigm for the deployment of data center network infrastructures. The solution to this challenge lies in the application of traffic engineering (TE) techniques, which considerably can improve network performance and service quality through multipath routing combined with traffic classification and prioritization. The use of TE is also aimed at reducing operational costs and preventing the emergence of congested segments within the network. The paper provides an analysis and comparison of existing technologies and engineering solutions for network resource optimization, including B4 (Google), Hedera, DevoFlow, Mahout, MiceTrap, and MSDN-TE. Particular attention is given to approaches such as Hedera, DevoFlow, Mahout, and MiceTrap, what rely on classifying flows into large "elephant flows" and small "mice flows" to offload the centralized SDN controller and increase service efficiency. In addition, MSDN-TE is considered, which leverages multipath routing in combination with the Eppstein algorithm. The latter computes the least-loaded path by assigning weights to each transmission path based on specific network metrics, thereby minimizing delay and packet loss. In this work proposed a modified load balancing method based on the Eppstein algorithm. The improvement enables simultaneous utilization of multiple equivalent transmission paths for real-time traffic between the source and the destination. This approach is particularly relevant when the bandwidth of the primary path is insufficient to meet required QoS parameters such as Delay, Packet Loss, and Jitter. To validate the proposed solution was deployed a virtual SDN data center segment with the help of ONOS and Mininet solutions. The results demonstrate that dynamic load balancing, based on the real-time utilization of transmission paths, represents an effective approach to improving QoS, mitigating the formation of bottlenecks, and ensuring reliable traffic delivery in SDN-based data center networks.

Key words: software-defined networking (SDN), data centers, quality of service (QoS), traffic engineering (TE), traffic transmission, network load balancing, OpenFlow, multi-path routing.

Дата надходження статті: 21.09.2025

Дата прийняття статті: 08.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/13>**Сайко В.Г.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Радзівілов Г.Д.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В.О.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Наритник Т.М.Спільне підприємство «Інститут електроніки та зв'язку
Української академії наук національного прогресу»**Фисюк А.О.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Криволапов Я.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Криволапов Г.Я.

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка

МОДЕЛЬ РОЗРОБКИ ПРОМІЖНИХ ЛАНОК ГІБРИДНОЇ WI-FI ТА MESH-МЕРЕЖІ НА БАЗІ КАНАЛУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

У статті представлено модель розробки проміжних ланок гібридної Wi-Fi та Mesh-мережі спеціального призначення, що функціонують на основі каналів терагерцового (THz) діапазону в системах типу Fi-Wi. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням потреб у високошвидкісній та відмовостійкій інфраструктурі для забезпечення критичних застосувань, включаючи системи зв'язку для надзвичайних ситуацій, військові та спеціальні мережі. Використання THz-спектра відкриває перспективи створення каналів із надвисокою пропускнуою здатністю, мінімальними затримками та можливістю обслуговування великої кількості користувачів одночасно, що особливо важливо в умовах складних топологій та багатопроменевого поширення сигналів. Запропонована архітектура орієнтована на підвищення стійкості до збоїв, ефективність маршрутизації та гнучке управління ресурсами мережі. Особлива увага приділена проміжним ланкам Mesh-мережі, які забезпечують безперервність покриття, оптимальний розподіл навантаження, масштабованість та адаптивність до зміни топологій. У роботі розглядаються принципи інтеграції Fi-Wi технологій, що поєднують бездротовий доступ у користувацькому сегменті з волоконно-оптичними магістралями у транспортній підсистемі. Це дозволяє формувати гібридні системи зв'язку спеціального призначення, здатні витримувати високі вимоги до якості обслуговування та кіберзахисту. Наукова новизна полягає у визначенні структурної моделі проміжних ланок та розробці підходів до їх оптимізації з урахуванням специфіки THz-каналів, включаючи вплив атмосферних втрат, шумових факторів і просторових обмежень. Практична значущість полягає у можливості використання результатів для створення захищених, надійних та високопродуктивних Fi-Wi мереж, орієнтованих на сценарії з підвищеною відповідальністю, де критичними є стійкість, продуктивність і здатність до швидкого розгортання.

Ключові слова: Fi-Wi mesh-мережа, терагерцовий діапазон, проміжні ланки, THz-канал, спеціального призначення.

© Сайко В.Г., Радзівілов Г.Д., Комаров В.О., Наритник Т.М., Фисюк А.О.,
Криволапов Я.В., Криволапов Г.Я., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Сучасний розвиток інформаційно-комунікаційних технологій зумовлює зростаючі вимоги до пропускної здатності, затримки та надійності безпроводових мереж. Перехід від класичних систем мобільного зв'язку до концепцій 5G/6G супроводжується активним впровадженням гібридних архітектур, які поєднують традиційні Wi-Fi-сегменти та динамічно самоорганізовані Mesh-мережі. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності таких мереж є використання частотного ресурсу терагерцового (ТГц) діапазону, що відкриває можливості для передачі даних на надвисоких швидкостях.

Терагерцовий діапазон забезпечує унікальні характеристики, серед яких – значна ширина смуги пропускання, потенціал підтримки масового доступу пристроїв Інтернету речей (IoT) та високоточне позиціонування. Водночас його застосування ускладнюється істотним впливом атмосферного поглинання, обмеженою дальністю дії та потребою у формуванні спрямованих променів для підтримання стійкого зв'язку. Це зумовлює необхідність розробки проміжних ланок та вузлів ретрансляції, які дозволяють оптимізувати топологію мережі, знижувати втрати сигналу й підвищувати енергетичну ефективність.

Особливого значення набуває побудова гібридних Wi-Fi та Mesh-мереж, де проміжні ланки виконують функції інтелектуальних ретрансляторів, що забезпечують баланс між швидкістю доступу та якістю обслуговування користувачів. Використання Mesh-архітектури дозволяє досягати високої гнучкості масштабування, резервування каналів і самовідновлення мережі при відмовах окремих вузлів. Застосування терагерцового каналу в такій архітектурі створює нові можливості для об'єднання локальних сегментів у єдину високошвидкісну систему.

Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених дослідженню Wi-Fi та Mesh-мереж, питання моделювання проміжних ланок на основі ТГц-каналу залишаються відкритими. Зокрема, недостатньо дослідженими є підходи до побудови математичних моделей, що враховують особливості поширення сигналів у міських умовах, вплив багатоприменовості та обмеження за енергоспоживанням. Це формує наукову й практичну актуальність представленого дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика створення Mesh-мереж нового покоління розглядається у численних роботах, присвячених підвищенню їх пропускної здатності, оптимізації топології та підвищенню надій-

ності. Дослідження останніх років зосереджені на можливостях використання міліметрового та терагерцового спектра для передачі даних, що дозволяє досягти швидкостей понад терабіт на секунду [1-28].

Серед актуальних напрямів досліджень виділяються:

- моделювання аква-атмосферних впливів на сигнал у ТГц-каналах;
- аналіз антенних рішень для спрямованої передачі у терагерцовому діапазоні;
- проектування архітектур бездротових мереж з використанням ТГц-лінків для високошвидкісного обміну даними;
- застосування ТГц-радіоліній для побудови mesh-мереж та інтеграції з волоконною інфраструктурою.

У працях [1-3] проаналізовано особливості поширення ТГц-сигналів, включно з поглинанням атмосферними газами, чутливістю до погодних умов та впливом багатоприменовості середовища. Відомі роботи [4-5] наголошують на потребі в оптимізації маршрутних протоколів для багаторівневих Mesh-мереж, оскільки традиційні алгоритми не враховують специфіку ТГц-каналів.

Окремі дослідження [6-8] стосуються інтеграції Fi-Wi систем, у яких оптичні магістралі поєднуються з бездротовими вузлами, що дає змогу створювати високопродуктивні гібридні архітектури. Значну увагу приділено питанням захищеності комунікацій у середовищах спеціального призначення [9-10], де критично важливими є безперервність зв'язку та стійкість до атак.

Узагальнення результатів цих робіт свідчить про актуальність подальших досліджень у напрямі створення моделей проміжних ланок Mesh-мереж, орієнтованих на ТГц-діапазон. Недостатньо вивченими залишаються аспекти практичної реалізації проміжних ланок у гібридних Fi-Wi архітектурах та методи підвищення їх стійкості й масштабованості. Саме цим питанням і присвячено дану роботу.

Мета статті полягає у розробці та обґрунтуванні моделі проміжних ланок Fi-Wi Mesh-мережі спеціального призначення на базі радіоканалів терагерцового діапазону, що забезпечують високошвидкісний обмін даними, масштабованість архітектури та підвищену стійкість до впливу зовнішніх факторів середовища.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі завдання:

1. Проаналізувати системну архітектуру Fi-Wi Mesh-мереж спеціального призначення з інтегра-

цією волоконно-оптичної та бездротової інфраструктури.

2. Розробити структурно-функціональну модель проміжних ланок на базі THz-каналу, яка включає геометричний, атмосферний, антенний, каналовий, шумовий та мережевий модулі.

3. Визначити основні параметри впливу атмосфери, спрямованості антен та умов поширення сигналу у терагерцовому діапазоні на ефективність зв'язку.

4. Сформуванати узагальнені критерії оцінювання працездатності проміжних ланок Fi-Wi Mesh-мереж з урахуванням їх практичного застосування у системах спеціального призначення.

5. Обґрунтувати наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів у контексті подальшого розвитку високошвидкісних бездротових мереж шостого покоління та вище.

Виклад основного матеріалу дослідження. Системна архітектура гібридної Fi-Wi mesh мережі спеціального призначення

Мета розробки телекомунікаційної системи

Розробити та прототипувати масштабовану Fi-Wi mesh-мережу спеціального призначення з використанням опорної волоконної інфраструктури та бездротових магістральних/проміжних ланок у терагерцовому діапазоні для забезпечення високошвидкісного обміну даними між вузлами. Цілі:

- забезпечити високу пропускну здатність магістралей між PoP/агрегаторами;
- мінімізувати затримки для додатків реального часу (телеметрія, HD-відео, аварійні повідомлення);
- забезпечити масштабованість, стійкість та безпеку мережі;
- підготувати моделі та симуляції для подальшої адаптації.

Короткий опис архітектури

Ядро (backbone): оптоволоконна мережа (Fi – Fiber) з PoP (points of presence це "точка присутності" оператора зв'язку, яка є фізичним місцем розміщення його обладнання для підключення клієнтів до мережі.)/центрами обробки, що забезпечує стійку магістральну пропускну здатність.

Магістральні/проміжні бездротові ланки (Wi – Wireless): високопродуктивні THz-ланки виконують роль «волокон без кабелю» – з'єднують віддалені PoP або тимчасові вузли там, де прокладання волокна недоцільне.

Mesh-вузли (access/relay): локальні вузли (edge devices) реалізують mesh-маршрутизацію між собою для забезпечення локального покриття; кожен вузол має інтерфейси: оптика (за потреби),

THz RF фронтенд (для backhaul), традиційні Wi-Fi / 5G-like інтерфейси для кінцевих пристроїв.

Контроль/оркестрація: централізований/гібридний контролер (SDN-підхід) для управління маршрутизацією, плануванням ресурсів та політиками QoS.

Канали управління: надійні контрольні канали по волокну або низькочастотному радіо для обміну керуючими даними (зашифровані).

Fi-Wi ядро (оптоволоконна інфраструктура + високошвидкісний бездротовий доступ) використовується для центральних вузлів (штаби, командні центри, мобільні пересувні вузли зв'язку).

У польових умовах мобільні підрозділи створюють Mesh-мережу, яка підключається до найближчого Fi-Wi вузла або працює автономно у випадку втрати магістралі.

Компоненти системи (рівні)

PoP / Центр обробки: маршрутизатори класу carrier/edge, оптичні мультиплексори, енергонезалежні джерела живлення.

THz-Radio Frontend: високочутливі приймачі/передавачі з вузьконаправленою антенною системою, бек-офісний радіочастотний контролер; включає механізми управління променем (beam-steering) на рівні фізичного шару.

Mesh-вузол: процесор/FPGA/SoC для функцій routing, MAC, PHY abstraction; інтерфейси Ethernet/optical/Wi-Fi; засоби локального зберігання та енергопостачання.

SDN/NMS: контролер для політик, оптимізації завантаження, моніторингу.

Засоби безпеки: модулі (HSM) для зберігання ключів, протоколи аутентифікації й шифрування, журналювання.

Приклади використання

- Штаб підключений до Fi-Wi.
- На передовій військовослужбовці підрозділів формують Mesh через переносні радіостанції.
- БПЛА виступає тимчасовим Mesh-вузлом для обходу перешкод.
- Сенсори та дрони передають дані через Mesh → Fi-Wi → центр.
- Зв'язок штабу зберігається навіть при знищенні частини вузлів.

Таким чином, така mesh-мережа на основі Fi-Wi у мобільних сценаріях є адаптивною, самоорганізованою системою, яка поєднує переваги оптики (швидкість, надійність) та гнучкість бездротової багатохопової мережі. Це дуже хороше рішення для військових дій, кризових ситуацій та розгортання зв'язку з нуля.

Модель розробки проміжних ланків Mesh-мережі на базі THz-каналу для Fi-Wi систем спеціального призначення.

Узагальнена характеристика моделі

Mesh-мережі Fi-Wi (Fiber-Wireless) спеціального призначення забезпечують високу пропускну здатність, низьку затримку та надійне покриття для бойових дій. Для розширення мережі та покриття важкодоступних або мобільних вузлів доцільно використовувати проміжні (relay) ланки на базі THz-діапазону (0.1–100 THz), що дозволяє організувати високошвидкісний безпроводний зв'язок між вузлами.

Модель описує поведінку проміжних бездротових ланків у терагерцовому діапазоні, які виконують роль магістральних каналів у Fi-Wi mesh-мережах спеціального призначення. Основна мета – забезпечити надійну та високошвидкісну передачу даних між вузлами з урахуванням фізичних особливостей THz-діапазону та вимог масштабованості мережі. Модель враховує геометрію розташування вузлів, спрямованість антен, атмосферні ефекти, молекулярне поглинання, наведення променя та фейдингові характеристики каналу. Вона також передбачає мульти-хопні шляхи, резервування та механізми відновлення сигналу. Критерії оцінки включають пропускну здатність, SNR/SINR, ймовірність втрати пакета, затримку та енергоефективність. Практична реалізація передбачає калібрування моделей фейдингу в полі, використання адаптивних частотних вікон і моніторинг погодних умов для оптимальної маршрутизації та управління потужністю.

Архітектурна моделі проміжних ланків

Блок-схема архітектурної моделі наведено на рис. 1.

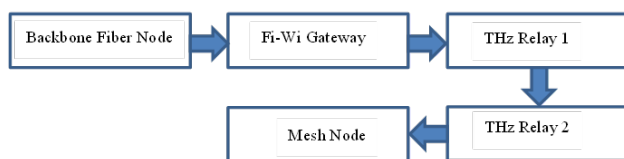


Рис. 1. Схема архітектурної моделі проміжних ланків

На схемі:

Fi-Wi Gateway: конвертує оптичний сигнал у THz і навпаки.

THz Relay: проміжна ланка, що здійснює ретрансляцію сигналу, може бути статичною або мобільною (наприклад, на БПЛА).

Mesh Node: кінцевий вузол мережі, який приймає або передає дані.

Backbone Fiber Node: магістральний оптичний вузол, який є "хребтом" телекомунікаційної

мережі, з'єднує локальні сегменти та забезпечує високошвидкісну маршрутизацію даних.

Запропонована схематична блок-схема для моделі THz Mesh-мережі показано на рис. 2.

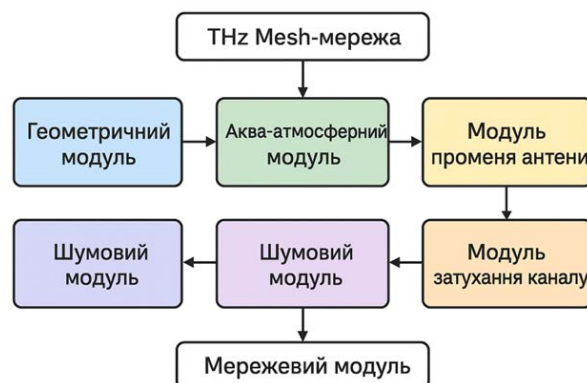


Рис. 2. Схематичний огляд/блок-схема для моделі THz Mesh-мережі

Модель описує передавально-приймальний ланцюг для THz Mesh-мережі з урахуванням геометрії вузлів, атмосферних/аква-атмосферних ефектів, характеристик променя антени, детального затухання каналу та шумових джерел. Мета – отримати реалістичні значення прийнятої потужності, SNR, ймовірностей відмови/виявлення і каналних показників (BER, capacity, outage) для різних сценаріїв (міські, прибережні, підводні/акваторичні шляхи).

Модель складається з шести ключових модулів (геометрія, аква-атмосфера, антенний промінь, затухання каналу, шум, мережевий), які поєднуються за формулою прийнятої потужності P_r та шумової потужності N_0 для отримання SNR і подальших метрик (BER, capacity, outage). Для THz-діапазону критичними є молекулярне поглинання і похибка наведення вузьких антенних пучків – ці ефекти мають окремі параметричні моделі і вимагатимуть Monte-Carlo симуляцій для отримання статистично надійних результатів.

Структура, призначення та функції модулів наведено в табл. 1.

Модель каналу THz для проміжних ланків

Для THz-каналу необхідно враховувати:

Вільно-просторове поширення (FSPL) [21]:

$$PL_{FS}(d, f) = \left(\frac{4\pi f d}{c} \right)^2, \quad (1)$$

де d – дальність зв'язку.

Молекулярне поглинання [22, 23] (див. рис. 3):

$$PL_{mol}(d, f) = e^{\alpha(f)d}, \quad (2)$$

де $\alpha(f)$ – коефіцієнт поглинання водяною паром та іншими газами (H_2O , O_2).

Таблиця 1

Структура, призначення та функції модулів

Назва модуля	Призначення	Ключові параметри	Основні формули	Зауваження
1	2	3	4	5
Геометричний модуль	задає розташування вузлів Mesh (координати в 3D), траєкторії руху (якщо рухомі вузли), орієнтацію антен і відстані між вузлами.	Вхідні дані: координати вузлів (x_p, y_p, z_p), орієнтація (азимут, елев.), рух/швидкість, межі зони покриття. Вихід: відстань d , кут відхилення променя θ , відношення лінії бачення (LoS) / NLoS, геометричні затінення.		Обчислювати реальні кути нахилу для кожного TX–RX зв'язку, оскільки вузькоспрямовані THz-антени дуже чутливі до pointing error. Врахувати перешкоди (будівлі, рельєф) або задавати їх як ймовірнісні карти покриття.
Атмосферний модуль	моделює вплив складу повітря/вологи, туману, опадів та (за необхідності) водяної поверхні/пари на поглинання й розсіювання в THz діапазоні.	частота f , концентрація водяної пари, температура T , тиск P , оптична щільність туману, параметри краплин (розмір, щільність).	– коефіцієнт молекулярного поглинання $k(f)$ (м/м) – залежить від спектральних ліній води й кисню; – поглинання на відстані d : $\alpha(f) = k(f)d$ – фактор затухання через поглинання: $e^{-\alpha(f)}$	Для THz діапазону молекулярне поглинання може домінувати; використовувати спектральні бази даних або параметризовані моделі (якщо доступно). Модуль повинен дозволити задавати сценарії: «сухо», «волога», «туман», «дощ» – зі своїми $k(f)$.
Модуль променя антени	моделює діаграму направленості, коефіцієнти підсилення антени та похибки наведення (pointing errors).	Вхід: тип антени (лаборат., рупор, фазована решітка), апертура/розмір D , робоча частота f , кут нахилу/наведення, усереднена ширина пучка (HPBW).	– довжина хвилі $\lambda = \frac{c}{f}$ – ідеальний коефіцієнт підсилення (приблизно): $G \approx \eta(\pi/D\lambda)^2$ (де η – ефективність); – модель діаграми: $G(\theta, \phi) = G_{max} \cdot F(\theta, \phi)$ (де F – нормована – форма променя, наприклад Gaussian); фактор помилки наведення (pointing loss) $L_{point} = \exp(-(\theta_{err}/\theta_0)^2)$ або інша модель залежно від розподілу помилки.	Для фазованих решіток – врахувати бокові вівтарі (sidelobes) та дискретизацію фаз. Для вузьких пучків навіть мала помилка наведення суттєво знижує Pr.
Модуль затухання каналу	сумує всі вкладені механізми загасання: геометричне (розсіювання), молекулярне поглинання, поверхневе розсіювання, втрати через дощ/туман, мультипатчинг (якщо присутній).		$P_r(d, f) = P_t G_t(\theta_t) G_r(\theta_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot L_{point} \cdot e^{-k(f)d} \cdot L_{misc}$ де: – P_t – потужність передавача, – G_t, G_r – коефіцієнти підсилення передавача і приймача, – λ – довжина хвилі, – $k(f)$ – сумарний коефіцієнт поглинання (молекулярний + оптичний), – L_{misc} – додаткові втрати (розсіювання, поверхневі втрати і т. ін.), – L_{point} – фактор pointing error.	Розділяти $k(f)$ на частки: $k_{molecular}(f)$, $k_{raindrop}(f)$, $k_{fog}(f)$ – для прозорості моделі. Для NLoS шляхів включати експоненційне/поліноміальне додаткове затухання або статистичні моделі (лог-нормальне розсіювання).

1	2	3	4	5
Шумовий модуль	формує рівень шуму на вході приймача, враховує тепловий шум, молекулярний шум, шум від елементів фронту прийому (LNA), та інші фонові джерела.		$N_0 = K_B T_{sys} B$ де: K_B – постійна Больцмана (1.38×10^{-23} J/K), T_{sys} – еквівалентна системна температура (включає атмосферу та шум ЛНА), B – ширина смуги (Hz). SNR: $SNR = \frac{P}{N_0}$	– Для THz може бути суттєвий додатковий вклад від молекулярної емісії: включити $T_{atm}(f)$ як функцію частоти. – Якщо модель враховує квантові ефекти (дуже широкі смуги/високі частоти), перевірити припущення класичного теплового шуму.
Мережевий модуль	Мережевий модуль відповідає за організацію логічних зв'язків між вузлами Mesh-мережі, маршрутизацію даних, управління ресурсами та забезпечення QoS у багатохопових топологіях. Він інтегрує результати фізичного рівня (потужність, SNR, BER) у мережеві алгоритми для вибору оптимальних маршрутів і планування передач.	Основні функції: Маршрутизація – вибір оптимального шляху між вузлами з урахуванням втрат у каналі, пропускної здатності та надійності. Розподіл ресурсів – керування смугою пропускання, динамічний вибір частот/каналів у THz-діапазоні. Управління трафіком – пріоритезація даних (службові, відео, сенсорні потоки). QoS та надійність – забезпечення мінімального рівня затримок і контроль імовірності відмови каналу. Самоорганізація Mesh – підтримка багатохоповості, балансування навантаження та резервування маршрутів. Інтеграція з Fi-Wi – забезпечує з'єднання між бездротовою THz-частиною та волоконно-оптичним сегментом.		Взаємодія з іншими модулями: – Отримує від канального модуля значення SNR та BER. – Використовує геометричний модуль для знання топології (координати вузлів). – Передає результати у вигляді таблиць маршрутів, карти пропускної здатності та QoS-параметрів для вищого рівня системи.

Загальні втрати каналу [24, 27]:

$$PL_{total}(d, f) = 10 \log_{10}(PL_{FS}) + \alpha(f)d \quad (3)$$

Функція SINR для проміжної ланки:

$$SINR = \frac{P_t G_t G_r}{PL_{total}(d, f) (N_0 B + I_{inter})}, \quad (4)$$

де:

P_t – потужність передавача.

G_t, G_r – коефіцієнти антен.

$N_0 B$ – шумова потужність.

I_{inter} – інтерференція від суміжних ліній.

Стратегія розробки проміжних ланків

Вибір частоти THz:

– 300 GHz, 600 GHz, 900 GHz – оптимальні для високої пропускної здатності на середні відстані (10–1000 м) (див. рис. 4).

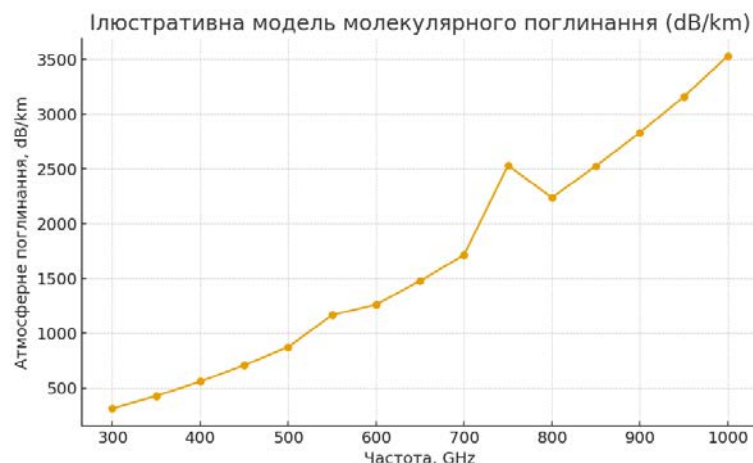


Рис. 3. Ілюстративна модель молекулярного поглинання

– Уникаємо сильних водяних резонансних смуг (HITRAN).

На рис. 4 наведено залежність пропускної здатності (throughput) від відстані для трьох робочих частот терагерцового діапазону (300, 600 та 900 ГГц) за умов відносної вологості повітря ($RH = 0\%$).

При відсутності вологості атмосферні втрати мінімальні, що дозволяє досягати високих швидкостей передачі даних на відстанях до 100–200 м.

Найкращі характеристики має частота 300 ГГц, яка забезпечує найбільшу пропускну здатність і найдовшу дальність роботи каналу.

Для частот 600 та 900 ГГц швидкість передачі значно зменшується вже після 50–100 м, що обмежує їх практичне застосування.

Визначення відстаней між вузлами [21, 28]:

Максимальна відстань d_{max} визначається обмеженням на SINR або BER:

$$d_{max} = \frac{1}{\alpha(f)} \ln \frac{P_t G_t G_r}{N_o B \text{SINR}_{min}} \quad (5)$$

Графік на рис. 5 показує залежність SINR від відстані у терагерцовому каналі

Як бачимо:

на коротких дистанціях (до ~200–300 м) SINR залишається високим;

після ~500 м відбувається різке падіння SINR через значні втрати;

понад 800–1000 м зв'язок практично неможливий без ретрансляції чи підсилення.

Вибір типу антен:

Напрявлені антенні решітки (URA) для зменшення інтерференції та підвищення SINR.

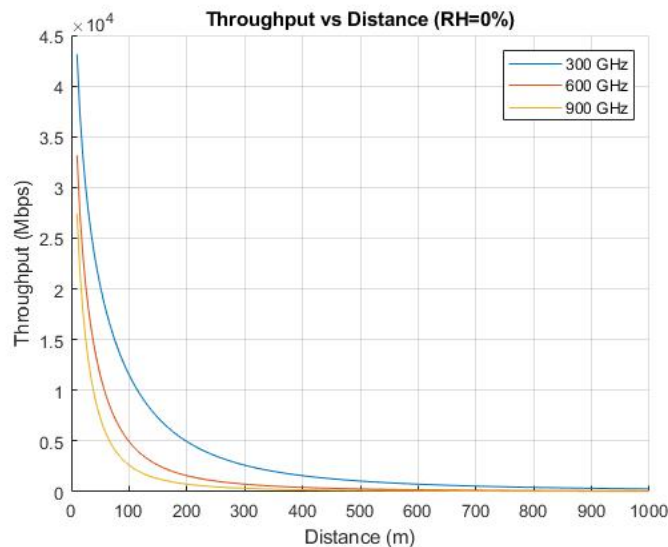


Рис. 4. Залежність пропускної здатності (throughput) від відстані

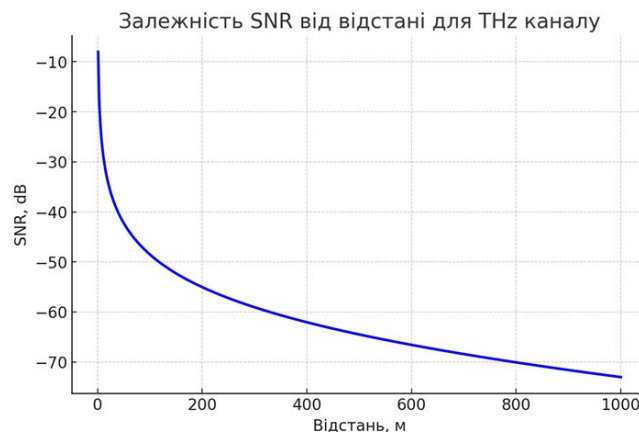


Рис. 5. Залежність SINR від відстані у терагерцовому каналі

Розміщення relay nodes:

Статичні: на дахах будівель, щоглах.

Мобільні: на БПЛА для динамічного покриття, адаптивного вибору маршруту.

Адаптивне керування маршрутом:

Використання алгоритмів QoS-aware mesh routing (наприклад, OLSR або AODV модифіковані під THz).

Можлива зміна частоти або проміжного вузла залежно від атмосферних умов.

Алгоритмічна модель (покроково)

Крок 1. Для кожного вузла мережі визначаємо потенційних проміжних relay nodes.

Крок 2. Розраховуємо $PL_{total}(d, f)$ для кожної можливої лінії.

Крок 3. Обираємо вузли, які забезпечують $SINR \geq SINR_{min}$.

Крок 4. Підраховуємо сумарний throughput через проміжні вузли.

Крок 5. Повторюємо для різних погодних умов (RH = 0%, 30%, 70%).

Математично [25,26]:

$$Throughput_{relay} = B \log_2(1 + SINR_{relay}) \quad (6)$$

Таким чином:

THz проміжні ланки дозволяють швидке розширення Mesh-мережі з високим throughput.

Врахування молекулярного поглинання

і атмосферних умов критично для точного планування відстаней між relay nodes.

Динамічне управління relay nodes (мобільні БПЛА) покращує надійність і адаптивність бойової Fi-Wi мережі.

Особливості та наукова новизна роботи**Особливості роботи**

У статті представлено системну архітектуру Fi-Wi mesh-мережі спеціального призначення, яка інтегрує волоконну опорну інфраструктуру та проміжні терагерцові (THz) ланки. Запропоновано узагальнену модель проміжних ланок у THz-діапазоні, що враховує вплив середовища, геометрію мережі та антенні характеристики. Структуровано функціональні модулі моделі: геометричний, аква-атмосферний, антенний, каналовий, шумовий та мережевий. Особливу увагу приділено забезпеченню високошвидкісного та надійного обміну даними між вузлами в умовах спеціальних застосувань.

Наукова новизна

– Уперше для Fi-Wi mesh-мереж спеціального призначення обґрунтовано використання проміжних THz-лінків як ключового елемента масштабованої архітектури.

– Запропоновано модульний підхід до побудови моделі проміжних ланок, який дозволяє системно враховувати багатофакторний вплив середовища, антенних систем та каналів зв'язку.

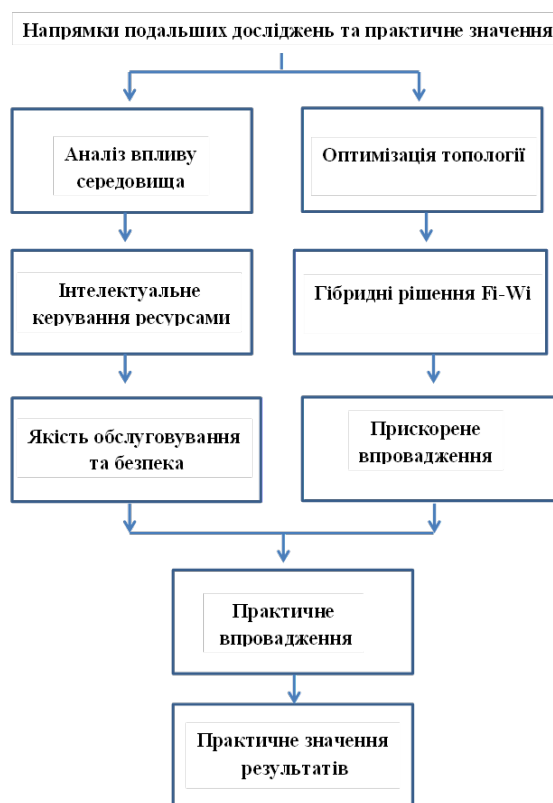


Рис. 6. Напрямки подальших досліджень

– Сформовано концепцію інтеграції мережевого модуля, що поєднує фізичний рівень із логікою управління потоками даних у спеціалізованих мережах.

– Створено теоретичне підґрунтя для подальшої оптимізації параметрів THz-радіоліній із метою підвищення пропускної здатності та стійкості до завад.

Напрямки подальших досліджень та практичне значення

Перспективи розвитку Fi-Wi Mesh-мереж на базі каналів терагерцового діапазону безпосередньо пов'язані з удосконаленням архітектурних рішень і підвищенням надійності функціонування систем у реальних умовах. Подальші дослідження доцільно зосередити на таких напрямках (див. рис. 6):

1. Аналіз впливу середовища. Поглиблене моделювання впливу атмосферних явищ (дощу, туману, пилу, вологості) та багатопроточності на параметри THz-каналів.

2. Оптимізація топології. Адаптивний вибір кількості й розташування проміжних вузлів з використанням алгоритмів глобальної оптимізації.

3. Інтелектуальне керування ресурсами. Створення алгоритмів динамічного розподілу спектра та когнітивних методів прогнозування стану каналу.

4. Гібридні рішення Fi-Wi. Поєднання оптичних та бездротових сегментів у проміжних ланках і забезпечення швидкого відновлення зв'язності при відмовах.

5. Якість обслуговування та безпека. Формування QoS-моделей і впровадження захищеної маршрутизації та шифрування даних у THz-каналах.

6. Практичне впровадження. Створення прототипів проміжних вузлів, проведення експери-

ментальних вимірювань і порівняння їх з теоретичними моделями.

Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі для проектування високошвидкісних телекомунікаційних систем спеціального призначення. Вона дозволяє оптимізувати структуру мережі, зменшити затримки, підвищити стійкість до завад і гарантувати заданий рівень QoS. Отримані результати можуть стати основою для створення прототипів апаратних рішень, розробки когнітивних алгоритмів керування ресурсами та впровадження на практиці надійних Fi-Wi систем нового покоління.

Висновки

1. Запропоновано системну архітектуру Fi-Wi mesh-мережі спеціального призначення, що поєднує волоконну опорну інфраструктуру з проміжними терагерцовими лінками для забезпечення високошвидкісного та надійного обміну даними.

2. Розроблено модульну модель проміжних ланок у THz-діапазоні, яка враховує геометричні, атмосферні, антенні, каналові, шумові та мережеві фактори, що забезпечує комплексний підхід до оцінки якості зв'язку.

3. Наукова новизна полягає у застосуванні проміжних THz-лінків як основи масштабованої архітектури та в інтеграції мережевого модуля для поєднання фізичного рівня з управлінням потоками даних.

4. Практична цінність роботи визначається можливістю використання отриманих результатів при проектуванні, оптимізації та моделюванні спеціалізованих Fi-Wi mesh-мереж у терагерцовому діапазоні.

Список літератури:

1. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, vol. 10, no. 10, pp. 3211–3221.
2. Nagatsuma T., Ducournau G., Renaud C.C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nature Photonics*, 2016, vol. 10, no. 6, pp. 371–379.
3. Han C., Wu J., Rangan S., Wang Z., Rappaport T.S. Terahertz wireless channels: A holistic survey on measurement, modeling, and analysis. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 834–887.
4. Akyildiz I.F., Kak A., Nie S. 6G and beyond: The future of wireless communications systems. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 133995–134030.
5. Chowdhury M.Z., Hasan M.K., Shahjalal M., Jang Y.M. 6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, vol. 1, pp. 957–975.
6. Vardakas J.S., Zorba N., Verikoukis C.V. A survey on QoE-oriented wireless resources management. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 123–145.
7. Maier M., Chowdhury M., Rimal B.P., van Heddeghem W. The tactile internet: Vision, recent progress, and open challenges. *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol. 54, no. 5, pp. 138–145.
8. Khalid Z., Iqbal A., Malik A.N., Qaraqe K. Fi-Wi access networks: A survey on integration challenges, solutions, and future research directions. *Computer Networks*, 2019, vol. 149, pp. 246–262.
9. Zhang Y., Chen X., Letaief K.B. Security and privacy for 6G: A survey on research directions and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 136–143.
10. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M. Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376.

11. Сайко В. Г., Наритник Т. М. Безпроводові системи зв'язку терагерцового діапазону : монографія. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2019. 68 с.
12. Сайко В. Г., Одарченко Р. С., Абакумова А. О., Наритник Т. М., Наконечний В. С., Домрачев В. М., Толюпа С. В., Заблоцький В. Ю., Баховський П. Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G : монографія. Київ : ТОВ «ІПро формат», 2021. 200 с.
13. Avdeenko G., Narytnik T., Korsun V., Saiko V. Simulation of a terahertz band wireless telecommunication system based on the use of IR-UWB signals. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, No. 10. P. 901–919.
14. Pavlov O. I., Guseva O., Yashchyshyn Y., Saiko V., Avdeyenko G. L. Mathematical Modeling of FMCW Radar: Signal at Receiver Input. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2024. Vol. 66, No. 12. P. 648–657. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202223181>
15. Saiko V., Odarchenko R., Zhurakovskiy B., Yevdokymenko M., Fesenko V., Tkachova O. A Model for Building a Wireless Terahertz Network for 5G NR. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). 2023. P. 1071–1076.
16. Сайко В. Г., Романов Д. О., Наритник Т. М., Комаров В. О., Фомін М. М. Аналіз перспектив використання терагерцового діапазону частот для безпроводових мереж зв'язку спеціального призначення. *Збірник наукових праць ВІПТ : системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2024. Вип. 5. С. 138.
17. Лукова-Чуйко Н. В., Толюпа С. В., Наконечний В. С., Сайко В. Г., Наритник Т. М., Домрачев В. М. Метод підвищення ефективності управління енергетичним потенціалом захищених радіоліній терагерцового діапазону з використанням штучного інтелекту. *Безпека інформаційних систем і технологій*. 2021. № 2. С. 38–43.
18. Saiko V., Narytnyk T. High-reliability 5G/IoT mobile communication method when using the terahertz wavelength range. Theoretical and scientific foundations in research in Engineering : collective monograph / Ed. by Saiko V., Narytnyk T. Boston : Primedia eLaunch, International Science Group, 2022. P. 477–497. DOI: 10.46299/ISG.2022.MONO.TECH.1. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-and-scientific-foundations-in-research-in-engineering/>
19. Сайко В. Г., Наритник Т. М., Баховський П. Ф. Модель підвищення показників якості обслуговування гетерогенної мережної інфраструктури терагерцового діапазону. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : технічні науки*. 2023. Т. 34 (73), № 1. С. 51–55.
20. Narytnik T., Saiko V., Bilous O., Fisun A. Energy calculation of the terahertz radio link. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, No. 6. P. 537–557.
21. Friis H. T. *A Note on a Simple Transmission Formula*, Proceedings of the IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946.
22. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C., Kochanov R. et al., *The HITRAN2020 molecular spectroscopic database*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol. 277, 107949, 2022.
23. ITU-R Recommendation P.676-12, *Attenuation by atmospheric gases*, International Telecommunication Union, Geneva, 2019.
24. Jornet J. M., Akyildiz I. F. *Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band*, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 10, no. 10, pp. 3211–3221, 2011.
25. Kokkonen J., Lehtomäki J., Juntti M. *A discussion on molecular absorption noise in the terahertz band*, Nano Communication Networks, vol. 8, pp. 35–45, 2016.
26. Papasotiriou E. N., Foudas I. K., Molisch A. F. *An experimentally validated fading model for terahertz wireless systems*, Scientific Reports, vol. 11, 20456, 2021.
27. Taleb F., Pinheiro M. J., D. B. da Costa et al. *Propagation of THz radiation in air over a broad range of frequencies and conditions*, Frontiers in Physics, vol. 11, 1224226, 2023.
28. Pozar D. M. *Microwave Engineering*, 4th ed., Wiley, 2012. (Для довідкових розрахунків антен, шуму та базових енергетичних формул, включаючи kTB).

Saiko V.G., Radzivilov G.D., Komarov V.O., Narytnyk T. M., Fysiuk A.O., Kryvolapov Ya.V., Kryvolapov H.Ya. MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF INTERMEDIATE LINKS IN HYBRID WI-FI AND MESH NETWORKS BASED ON THE TERAHERTZ BAND CHANNEL

The article presents a comprehensive model for the development of intermediate links in hybrid Wi-Fi and Mesh networks designed for mission-oriented applications, based on terahertz (THz) band channels within Fi-Wi systems. The relevance of this study stems from the rapidly growing demand for high-speed, fault-tolerant, and secure communication infrastructures that can support critical scenarios, including emergency response, military networks, and special-purpose communication systems. The adoption of the THz spectrum is justified by its unique capability to deliver ultra-high capacity, extremely low latency, and support for massive user density in complex topologies affected by multipath signal propagation. The proposed network architecture is focused on enhancing fault tolerance, improving routing efficiency, and enabling flexible resource allocation in dynamically changing environments. Particular emphasis is placed on intermediate Mesh links that provide continuous coverage, optimal load balancing, scalability, and adaptability to topological changes. The integration of Fi-Wi technologies, which combine wireless access in the user segment with fiber-optic backbones in the transport infrastructure, is explored as a key element for achieving hybrid mission-specific communication systems. Scientific novelty lies in the definition of a structural model for intermediate links and the substantiation of optimization principles that account for the peculiarities of THz channels, including atmospheric attenuation, noise impact, and spatial limitations. The practical value of the study is expressed through the applicability of the obtained results for designing secure, reliable, and high-performance Fi-Wi networks, particularly relevant for high-responsibility scenarios where resilience, efficiency, and rapid deployment are essential.

Key words: Fi-Wi mesh network, terahertz band, intermediate links, THz channel, mission-oriented.

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 13.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Тимофеев Є.М.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Стаття присвячена методу підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) шляхом інтеграції технології множинного входу-множинного виходу (МІМО) у підсистеми доступу та транспорту. Об'єкт дослідження – МБСМ з рухомими сенсорними вузлами й обмеженими радіоресурсами; предмет – методологія поєднання просторового мультиплексування, рознесення та формування променя з адаптивним керуванням мережевими параметрами. У публікації узагальнюються передумови застосування МІМО в МБСМ, формалізуються вимоги до моделей каналу та трафіку, визначаються вихідні параметри симуляцій (моделі завмирань, довжини пакетів, бітові швидкості, сценарії мобільності), а також описуються варіанти просторових конфігурацій (2×2 , 2×4 , 4×4 ; кооперативне/віртуальне МІМО для одноантенних вузлів).

Методична частина охоплює алгоритми оцінювання стану каналу (LS, MMSE, RLS/Калман), адаптивне кодування та перемикання режимів «мультиплексування $\leftrightarrow$ рознесення» залежно від SNR, рівня інтерференції та характеру мобільності. Додатково розглядаються механізми просторового розділення користувачів і рекомендації щодо налаштування протоколів доступу в умовах змінної щільності вузлів. Передбачено порівняльний імітаційний експеримент, що оцінює пропускну здатність маршрутів, наскрізну затримку, ймовірність пакетної помилки й ефективність енергоспоживання для різних топологій, а також вплив швидкості переміщення вузлів на якість сервісу в сценаріях квазімобільності.

Запропонована структура дослідження орієнтована на відтворюваність: усі кроки моделювання, вхідні дані та формат виходу планується подати у вигляді відкритих скриптів і графіків, що полегшує валідацію результатів. Практична цінність роботи полягає у можливості подальшого використання розроблених методик у прикладних інженерних системах – від промислового моніторингу, транспорту та «розумних міст» до охорони довкілля й підвищення стійкості критичної інфраструктури, а також як методологічної бази для побудови нових протоколів мобільних сенсорних мереж із підтримкою МІМО.

Ключові слова: МІМО, мобільні безпроводові сенсорні мережі, пропускна здатність, оптимізація трафіку, динамічне управління мережею, надійність зв'язку, просторове мультиплексування, критичні умови.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ), що застосовуються для моніторингу об'єктів у реальному часі, зокрема у сфері критичної інфраструктури, зумовлює необхідність підвищення їх пропускної здатності без погіршення енергоефективності та стабільності зв'язку. Ключовою технічною проблемою залишається обмежена пропускна здатність у динамічних умовах функціонування, особливо за наявності мобільних сенсорних вузлів. Це обмежує масштабованість мережі та негативно впливає на якість і своєчасність збору даних.

Перспективним напрямом вирішення зазначеної проблеми є впровадження технології МІМО, яка завдяки просторовому мультиплексуванню дозволяє підвищити пропускну здатність без залучення додаткового спектра або збільшення потужності передавання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ефективного застосування технології МІМО у мобільних безпроводових сенсорних мережах (МБСМ) активно висвітлюється в огля-

дових і прикладних роботах, де підкреслюються базові переваги просторового мультиплексування, рознесення, формування променя та попереднього кодування [3; 4; 5] для підвищення спектральної ефективності та якості зв'язку. З позиції багатокористувацького доступу наголошується на доцільності MU-MIMO і Massive-MIMO для одночасного обслуговування множини терміналів [6; 7; 8], що критично для навантажених сенсорних кластерів. Для сенсорних мереж із одноантенними вузлами активно досліджуються підходи Cooperative/Virtual MIMO, які формують «віртуальні» антенні решітки та дозволяють отримувати вигоди в ємності та надійності без апаратного ускладнення вузлів. Окремі роботи демонструють приріст пропускної здатності за рахунок адаптивних MIMO-схем (зокрема, SVD-базованих) [10] у WSN-сценаріях, а також розглядають перевантажені режими просторового мультиплексування та стійкість до варіацій антенного складу.

Разом з тим, низка джерел відзначає обмеження, важливі саме для МБСМ: додаткові енергетичні витрати на декілька радіотрактів і оцінку стану каналу [7; 8], що впливають на тривалість автономної роботи вузлів; накладні витрати та затримки, пов'язані з CSI-зворотним зв'язком [5] в умовах мобільності та швидкої зміни каналу; а також відсутність узгоджених міжрівневих (PHY–MAC–routing) політик [9; 12; 15], які б системно інтегрували можливості MIMO у механізми множинного доступу й маршрутизації сенсорних мереж. Практичні матеріали індустріальних розробників (довідники/white-papers) імітують типові вигоди SU/MU-MIMO та beamforming у Wi-Fi-подібних системах [4; 5; 8], але орієнтовані переважно на стаціонарні або помірно мобільні клієнти та не охоплюють повного стеку задач МБСМ. У вітчизняному контексті підкреслюється значущість динамічної топології й ролі інфраструктурних вузлів (ТАП) для підвищення пропускної здатності та керованості мережі; модернізація цих підходів шляхом MIMO-інтеграції виглядає логічним кроком еволюції.

Отже, попри добре опрацьовану теорію MIMO та наявні приклади її застосування у безпроводових системах загального призначення, залишається недостатньо деталізованою методологія інтеграції MIMO саме в архітектуру МБСМ з урахуванням мобільності вузлів, енергетичних обмежень, накладних витрат на CSI і вимог до QoS. Саме ця прогалина визначає актуальність подальшого дослідження, зосередженого на міжрівневій інтеграції (PHY–MAC–routing), параметризації

режимів «мультиплексування/рознесення» та відтвореному порівняльному моделюванні «без MIMO ↔ з MIMO» для типових навантажень і сценаріїв рухомості.

Метою статті є обґрунтування та формалізація методу застосування технології MIMO для підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) у динамічних умовах їх функціонування. Дослідження зосереджено на принципах конфігурації та архітектурних підходах до інтеграції MIMO у МБСМ, а також на аналізі впливу такої інтеграції на якість зв'язку, енергоефективність та стабільність передачі даних під час моніторингу об'єктів критичної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. МБСМ – це множина мобільних сенсорних вузлів (МСВ), які самоорганізуються в багатоходові маршрути для збору та доставки даних у реальному часі. Типові сфери застосування: оперативний моніторинг об'єктів критичної інфраструктури (мости, трубопроводи, ЛЕП), реагування на надзвичайні ситуації, екологічний моніторинг та тимчасові тактичні мережі зв'язку. МСВ характеризуються обмеженим енергобюджетом, компактними антенами та невисокою обчислювальною потужністю; середовище поширення зазвичай багатопроменеве з істотними завмираннями та перешкодами.

Ключові показники якості: агрегована пропускна здатність і індивідуальна швидкість вузлів, наскрізна затримка та її варіабельність, імовірність пакетної помилки (PER), стабільність з'єднань (LLT), енергоефективність (біт/Дж) і справедливість доступу до ресурсу.

Виклики пропускної здатності в динамічних МБСМ:

- Багатопроменевість та зникання сигналу спричиняють флуктуації SNR, що підвищує PER і частоту повторних передач.

- Інтерференція у спільному ефірі робить роботу класичних MAC-протоколів (CSMA/CA тощо) менш ефективною зі зростанням навантаження; виникають ефекти «прихованих/відкритих» вузлів.

- Багатоходовість дробить ефірний час між ретрансляціями; вузли лімітують наскрізну швидкість.

- Мобільність призводить до частих перебудов маршрутів та доплерівських зсувів на швидких лінках, що збільшує службовий трафік і затримку.

- Периферійні вузли працюють на низькому SNR, що знижує мінімальні (нижні перцентилі)

швидкості й погіршує справедливість обслуговування.

– Енергетичні обмеження посилюють негативний вплив повторних передач і неефективних процедур доступу.

МІМО додає просторовий вимір до радіоканалу та забезпечує:

– просторову рознесеність (diversity): зменшення BER/PER за рахунок об'єднання незалежних копій сигналу (напр., MRC) [4; 5];

– просторове мультиплексування (SMX): передавання кількох потоків у тій самій смузі з теоретичним приростом $\min(N_t, N_r)$ потоків [1; 3; 5];

– формування променя/попереднє кодування: фокус енергії у бік адресата та пригнічення інтерференції, у т.ч. MU-MIMO для одночасного обслуговування кількох MCB [5; 6; 8].

У контексті МБСМ доцільно:

– використовувати 4×4 Massive MIMO на телекомунікаційних аероплатформах (ТАП) або шлюзах, де доступні більші енергетичні та апаратні ресурси;

– застосовувати 1×2 або 2×2 на MCB для рознесеності (покращення на краях покриття) або SMX за достатнього SNR;

– поєднувати МІМО-рішення з адаптивним керуванням ТАП і параметрами МАС/маршрутизації, щоб перетворювати виграші на рівні лінків у приріст наскрізної пропускної здатності, зменшення затримки та покращення справедливості.

На рисунку 1 зображено узагальнену схему інтеграції технології МІМО у мобільну безпроводову сенсорну мережу. Дані від мобільних сенсорних вузлів надходять на фізичний та каналний рівні, де динамічно обираються режими просторового мультиплексування, просторова рознесеність і формування променя. Далі трафік агрегується телекомунікаційною аероплатформою з багатоантенною конфігурацією, а система керування в ядрі мережі аналізує показники якості (пропускна здатність, затримка, ймовірність пакетної помилки) та формує керувальні дії для адаптації параметрів мережі. Стрілки показують потоки даних і зворотні сигнали керування, що забезпечують підвищення пропускної здатності та надійності в динамічних умовах.

Розглянемо математичні моделі для МБСМ з інтеграцією МІМО.

Ймовірність пакетної помилки для пакета довжини L біт:

$$PER = 1 - (1 - BER)^L.$$

Для BPSK в каналі АБГШ: $BER_{AWGN} = Q(\sqrt{2\gamma})$, де γ – SNR. Для Релея без рознесеності (усереднення за завмираннями) відома оцінка:

$$BER_{Rayleigh} \approx \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma}{1 + \gamma}}\right).$$

За максимальною комбінованою рознесеністю порядку d (наприклад, $d = N_t N_r$ для МІМО з MRC) ефективний виграш за SNR можна подати як

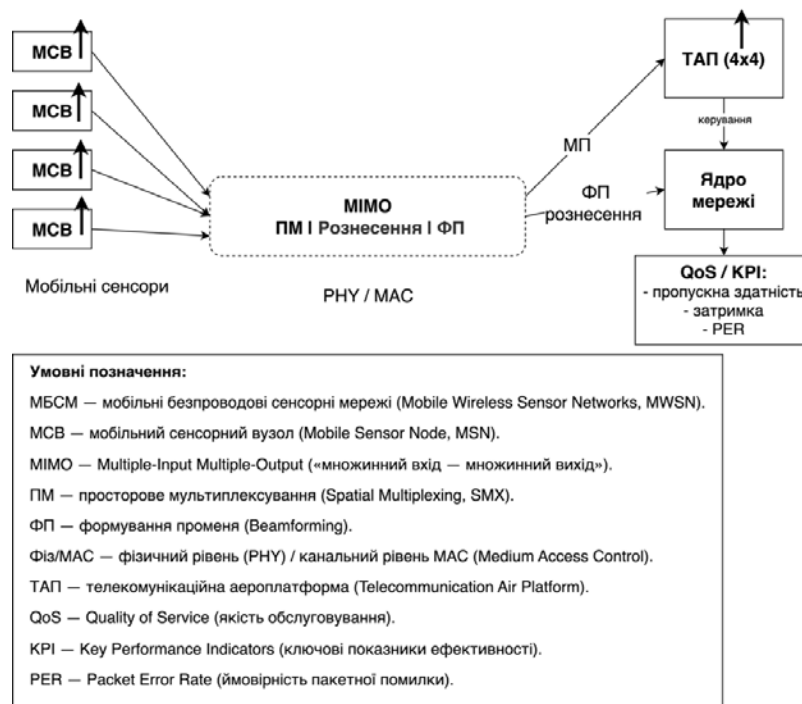


Рис. 1. Архітектура МБСМ із МІМО та ТАП

$$\gamma_{eff} = \gamma \cdot G_{div}, G_{div} \approx d,$$

а при формуванні променя – додатковий вигравш G_{bf} у децибелах (типово 3 – 6 дБ залежно від апертури та середовища). Тоді:

$$\gamma_{MIMO} = \gamma \cdot G_{div} \cdot 10^{\frac{G_{bf}}{10}}, PER_{MIMO} = 1 - (1 - BER(\gamma_{MIMO}))^L.$$

Моделюємо втрати на шляху:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \log_{10} \frac{d}{d_0}.$$

Гранична відстань d_{max} знаходиться зі співвідношення $SNR(d_{max}) = \gamma_{min}$ (потрібний мінімальний SNR для заданого PER). З урахуванням вигравшів MIMO отримаємо просту оцінку розширення радіуса:

$$d_{max}^{MIMO} = d_{max} \cdot 10^{\frac{G_{bf} + 10 \log_{10} G_{div}}{10\alpha}}$$

тобто приріст радіуса лінійно залежить від сумарного дБ-виграшу та обернено – від показника загасання α . Це напряду масштабує ефективний радіус стільника ТАП і радіус прямого з'єднання «вузол-вузол». Базові орієнтири для МБСМ без MIMO (польові/міські умови) – ~600 м для «вузол-вузол» і до ~3 км для «вузол-ТАП» за умов видимості; MIMO додає запас за рахунок $G_{div} + G_{bf}$.

За сталого радіуса покриття R та відносної швидкості v_{rel} середня тривалість з'єднання для траєкторії, що перетинає зону покриття, оцінюється як

$$LLT \approx \frac{\kappa R}{v_{rel}},$$

де $\kappa \in [1, 2]$ залежить від сценарію мобільності (для «випадкових напрямків» ближче до 1, для «блукання в полі» – вище). З урахуванням MIMO $R \rightarrow R_{MIMO}$, тож LLT зростає пропорційно до коефіцієнта розширення радіуса з попереднього підпункту [15].

Для SU-MIMO ємність каналу:

$$C = B \log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} H H^H \right)$$

де H – матриця каналу, ρ – відношення сигнал/шум на вході приймача, B – смуга. Оцінка пропускної здатності для ідеалізованого MIMO-каналу:

$$C \approx B \sum_{i=1}^{\min(N_t, N_r)} \log_2 (1 + \rho \lambda_i).$$

а в «середній» формі:

$$C \approx B \cdot N_{str} \cdot \log_2 (1 + \gamma_{MIMO}), N_{str} \leq \min(N_t, N_r).$$

де N_{str} – кількість просторових потоків (мультиплексування). Для MU-MIMO формування вузьких променів одночасні передачі різним абонентам підвищують ефективність MAC-рівня:

$$C_{MAC} \approx \eta_{MAC} \cdot \sum_{u=1}^U C_u$$

де η_{MAC} – коефіцієнт корисного ефірного часу з урахуванням колізій/зворотних відліків,

U – число одночасно обслуговуваних користувачів. Пропускна здатність маршруту визначається «вузьким місцем»:

$$C_{path} = \min_{\ell \in \text{маршрут}} C_{\ell}$$

Завдяки просторовому розділенню та формуванню променя знижується взаємна інтерференція, отже, зростає η_{MAC} . У спрощеному вигляді:

$$\eta_{MAC}^{MIMO} \approx \eta_{MAC}^{SISO} \cdot \phi(\Delta I),$$

де $\phi(\cdot) > 1$ – зростаюча функція зменшення інтерференції ΔI через просторові ступені свободи (якісна модель для аналітичних оцінок і калібрування симулятора).

Для одного посилення з інтенсивністю надходження λ і середнім часом обслуговування $E[S]$ (включає передачу й можливі повтори) застосуємо M/G/1:

$$\rho = \lambda E[S], E[T] = E[S] + \frac{\lambda E[S^2]}{2(1 - \rho)}$$

Час обслуговування:

$$E[S] = \frac{L/B_{eff}}{1 - PER}, B_{eff} = \frac{C}{\chi},$$

де $\chi \geq 1$ відображає накладні витрати MAC/РНУ (преамбули, міжкадрові інтервали), C – ємність лінії. Сумарна наскрізна затримка маршруту – сума по лінках:

$$E[T_{e2e}] = \sum_{\ell \in \text{маршрут}} E[T]_{\ell} + T_{prop}.$$

MIMO впливає відразу на всі складові: збільшує C , зменшує PER, тим самим зменшуючи $E[S^2]$ і навантаження ρ . У результаті

$$E[T_{e2e}]_{MIMO} < E[T_{e2e}]_{SISO}$$

за однакових λ та маршрутизації, причому вигравш зростає зі збільшенням N_{str} і вигравшів G_{div}, G_{bf} .

Запропонований метод спрямований на підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж завдяки адаптивному використанню технології MIMO на фізичному та каналному рівнях із плавним перемиканням між просторовим мультиплексуванням і режимами підвищення надійності (просторова рознесеність / формування променя). У кожному контрольному інтервалі тривалості T_{ctrl} мережа, спираючись на оцінений стан каналу та стан черг, обирає кількість просторових потоків $N_s \leq \min(N_t, N_r)$ та режим: мультиплексування – коли канал має достатній ефективний ранг і забезпечує цільову якість; рознесеність/формування променя – коли спостерігається деградація через рух, завмирання чи кореляцію. Якість одиничного посилення описуємо через γ (SNR/SINR) з урахуванням великомасштабного загасання та дрібномасштабних флуктуацій. У децибелах:

$$SNR(d)_{dB} = P_{tx}^{dBm} - [PL(d_0) + 10 n \log_{10}(d/d_0)] - N_0 B + G_{MIMO}.$$

де n – показник загасання, $N_0 B$ – шум у смузі B , а G_{MIMO} – сумарний виграш за рахунок просторової обробки (орієнтовно $10 \log_{10} N_r$ дБ для MRC, $10 \log_{10} N_t$ дБ для MRT; при мультиплексуванні потужність ділиться між потоками). Миттєвий канал моделюємо матрицею $H \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$. Для SU-MIMO цільова ємність:

$$C = B \mathbb{E} \left[\log_2 \det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} H H^H \right) \right],$$

а робоча оцінка через власні значення λ_i [1; 3] матриці $H H^H$ зводиться до

$$C \approx B \sum_{i=1}^{N_s} \log_2 (1 + \rho \lambda_i) \approx N_s B \log_2 (1 + \gamma_{\text{per-stream}})$$

де $\gamma_{\text{per-stream}}$ – SNR одного просторового потоку. Для MU-MIMO на аероплатформі з лінійним передкодуванням (ZF/RZF) середня корисна пропускна здатність інтервалу:

$$C_{\text{MU}} \approx \eta_{\text{MAC}} B \sum_{u=1}^U \log_2 (1 + \text{SNR}_u).$$

де U – кількість одночасно обслуговуваних вузлів; $\eta_{\text{MAC}} \in (0,1)$ – коефіцієнт корисного ефірного часу з урахуванням накладних і колізій. Помилка на рівні бітів і пакетів пов'язана з SNR. Для BPSK в AWGN:

$$P_b = Q(\sqrt{2\gamma}), \text{PER} = 1 - (1 - P_b)^L \approx 1 - e^{-L P_b}$$

а для каналу Релея усереднений $\bar{P}_b = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{\frac{\gamma}{1+\gamma}})$. Затримка визначається сумою часу обслуговування й очікування у черзі; для M/G/1:

$$\rho = \lambda \mathbb{E}[S], \mathbb{E}[T] = \mathbb{E}[S] + \frac{\lambda \mathbb{E}[S^2]}{2(1-\rho)}, \mathbb{E}[S] = \frac{\bar{C}_{\text{eff}}}{1 - \text{PER}}, C_{\text{eff}} = \frac{C}{\chi},$$

де $\chi \geq 1$ – накладні РНУ/MAC. Саме зв'язка « $C \uparrow \Rightarrow \text{PER} \downarrow \Rightarrow \mathbb{E}[S] \downarrow$ » забезпечує помітне зниження середньої наскрізної затримки.

Постановка експерименту – порівняння без методу підвищення пропускної здатності та з методом за однакових умов. Розглядається квадрат 1000×1000 м, $N \approx 150$ мобільних сенсорних вузлів, $A \approx 3$ телекомунікаційні аероплатформи; мобільність Random Waypoint/Random Direction зі швидкостями 1–5 м/с; час симуляції T_{sim} . Трафік вузла – пуассонівський (λ пакет/с), довжина пакета $L = 1024$ біт. Базові радіопараметри: P_{tx} вузлів/ТАП, шумова щільність N_0 , смуга B , дистанційні втрати $PL(d)$ із показником n . Без методу всі лінки SISO (1×1), параметри РНУ/MAC фіксовані (включно з χ , η_{MAC}) [3; 4].

З методом лінку вузол $\leftrightarrow$ вузол та вузол $\leftrightarrow$ ТАП можуть працювати як 2×2 , 2×4 або 4×4 ; у кожному T_{ctrl} виконується вибір N_s і режиму. Рішення приймається за порогоми: якщо ефективний ранг $r \geq 2$ і $\text{PER} \leq \text{PER}_{\text{ціль}}$, активуємо мультиплексу-

вання з $N_s = \min \{r, N_{s,\text{max}}\}$; інакше – формування променя (MRC/MRT). На ТАП одночасно обслуговується до U_{max} вузлів, що відбираються за пріоритетом $\pi_i = Q_i / \hat{E}[S_i]$ за умови $\text{SINR}_u \geq \text{SINR}_{\text{min}}$.

Проведено відтворюваний імітаційний експеримент на квадратній області 1000×1000 м з $N_{\text{вузлів}}$ мобільних сенсорних вузлів і $N_{\text{ТАП}}$ телекомунікаційних аероплатформ. Для кожного вузла призначається найближча ТАП; трафік вузлів – пуассонівський із інтенсивністю λ пакет/с, довжина пакета L біт. Радіоканал моделюється лог-дистанційними втратами з показником загасання n і дрібномасштабними замираннями Релея. Шумова потужність у смузі $B - N_0 B$. Для кожного лінка розраховується базовий SNR (у дБ), після чого в сценаріях із методом виконується адаптивний вибір режиму: просторове мультиплексування (до $N_s = \min(N_t, N_r)$ потоків) за умови достатнього SNR та ефективного рангу; або режим підвищення надійності (просторова рознесеність/формування променя) з еквівалентним виграшем $G_{\text{div/bf}}$ у дБ [5; 6; 8]. Миттєву ємність лінка оцінюємо наближенням Шеннона:

$$C = \eta_{\text{MAC}} B \sum_{i=1}^{N_s} \log_2 (1 + \gamma_i)$$

де η_{MAC} – частка корисного ефірного часу, γ_i – SNR i -го просторового потоку з урахуванням поділу потужності при мультиплексуванні та/або виграшу рознесеності/променя. Ймовірність пакетної помилки для BPSK в AWGN апроксимуємо через BER $p_b \approx \frac{1}{2} e^{-\gamma}$ та $\text{PER} = 1 - (1 - p_b)^L$. Ефективна швидкість обслуговування μ (пакет/с) дорівнює C/L , з поправкою на $(1 - \text{PER})$. Середню наскрізну затримку оцінюємо M/M/1-наближенням $\mathbb{E}[T] \approx 1/(\mu_{\text{eff}} - \lambda)$ за $\rho = \frac{\lambda}{\mu_{\text{eff}}} < 1$; агрегований throughput – сумою успішно переданих бітів за одиницю часу. Середній час «життя» з'єднання (LLT) зв'язуємо з ефективним радіусом покриття:

$$R_{\text{MIMO}} \approx R_{\text{SISO}} \cdot 10^{G_{\text{MIMO}}/(10n)},$$

де G_{MIMO} – сумарний дБ-виграш режиму; тоді $\text{LLT} \propto R/v$.

Порівняльний імітаційний аналіз показав, що в умовах низького SNR (профіль low) адаптивний метод із використанням конфігурації 4×4 забезпечує збільшення середньої пропускної здатності приблизно у 14.8 разів відносно SISO (0.002061 проти 0.000139 Мбіт/с), при одночасному зменшенні наскрізної затримки на 37%, зниженні PER на 38.6% та збільшенні середнього часу існування з'єднання на 190%. У помірному каналі (mod) пропускна здатність для всіх конфігурацій є близькою до межі MAC і зростає незначно, проте саме

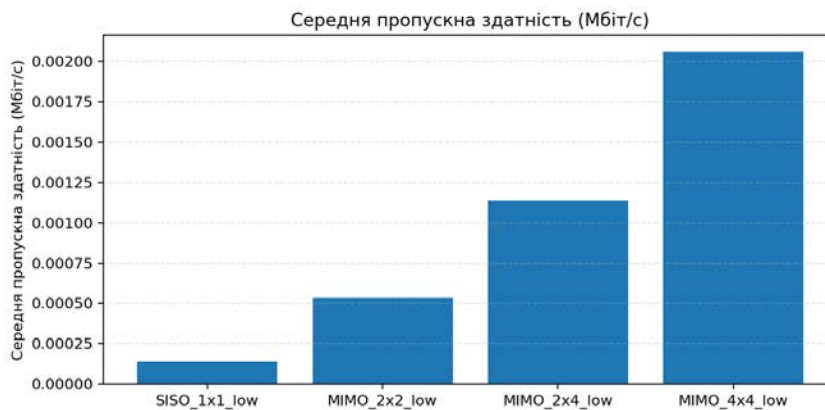


Рис. 2. Середня пропускна здатність мережі у профілі low

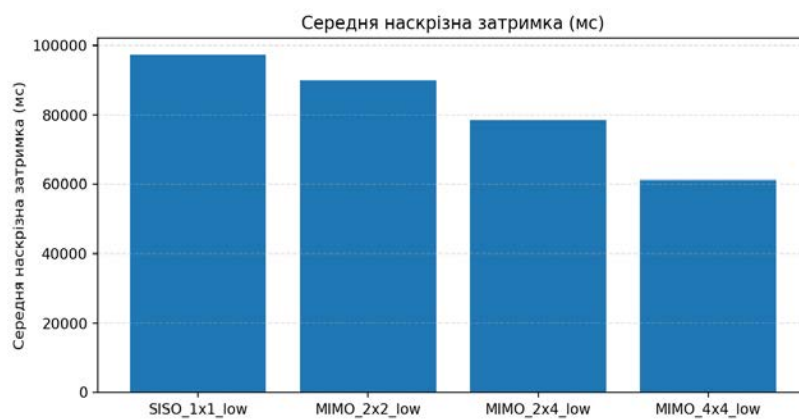


Рис. 3. Середня наскрізна затримка у профілі low

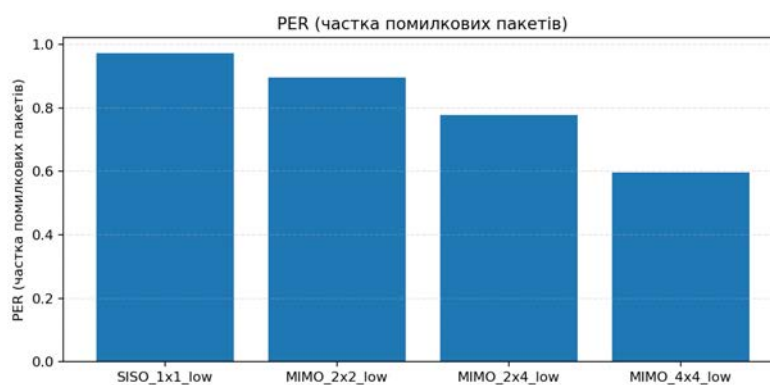


Рис. 4. Ймовірність пакетної помилки (PER) у профілі low

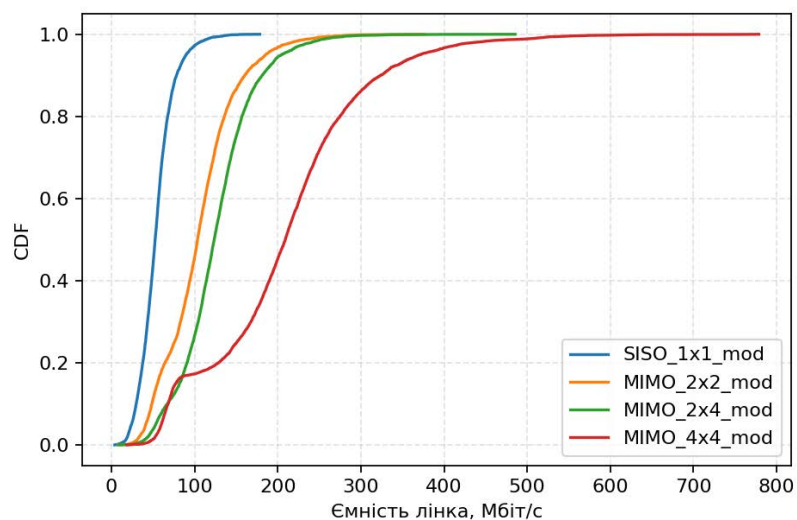


Рис. 5. Криві CDF ємності лінка у профілі low для SISO та конфігурацій MIMO

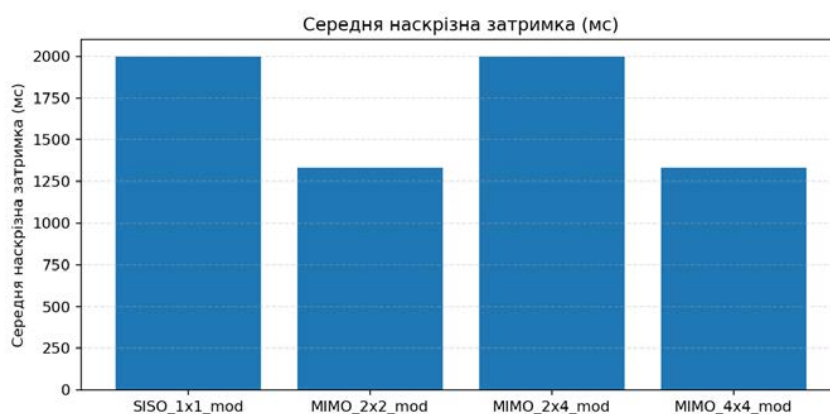


Рис. 6. Середня наскрізна затримка у профілі mod

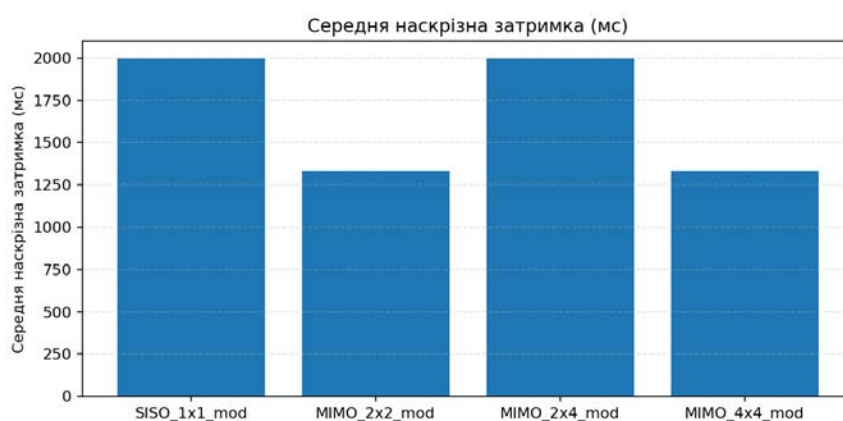


Рис. 7. Ймовірність пакетної помилки (PER) у профілі mod

за рахунок адаптивного вибору режиму (просторове мультиплексування або рознесеність/формування променя) досягається зменшення затримки на $\approx 33\%$ (2×2 та 4×4) і суттєве зниження PER (до -51.6% для 2×2), а також помітне збільшення LLT (до $+234\%$ для 4×4).

Висновки. Запропонований підхід інтегрує MIMO у МБСМ як адаптивний механізм на фізичному та каналному рівнях, що в кожному інтервалі керування обирає між просторовим мультиплексуванням і режимами підвищення надійності (рознесеність / формування променя) за критерієм очікуваного корисного *goodput* з урахуванням PER. Така постановка дає змогу переносити виграші на рівні лінки у мережеві показники QoS – зменшення затримок і втрат та підвищення стабільності з'єднань.

Імітаційні результати показали, що найбільший ефект досягається у складних радіоумовах, де адаптивний вибір режиму компенсує замирання та кореляцію каналів, а збільшення антенної конфігурації на ТАП істотно розширює область стійкого зв'язку. У помірних умовах, де система наближається до обмежень рівня доступу, метод переважно покращує надійність і затримку, зберігаючи пропускну здатність на рівні, визначеному MAC-навантаженням.

Доцільно застосовувати багатоканальні конфігурації MIMO на телекомунікаційних аероплатфор-

мах/шлюзах, а на сенсорних вузлах – легші варіанти з можливістю перемикання режимів [5; 6; 8]. Інтервал керування слід узгоджувати з часом когерентності каналу, а пороги за PER/SINR – з цільовими вимогами QoS. MU-MIMO на ТАП варто використовувати для паралельного обслуговування кількох вузлів, коли це не погіршує надійність.

Наукова новизна полягає у поєднанні: PER-орієнтованого вибору режиму (мультиплексування $\leftrightarrow$ рознесеність/формування променя) на рівні лінки; урахування MU-MIMO ефективності на ТАП для перетворення локальних виграшів у системні; зв'язування цих рішень із чергами на рівні мережі.

У моделюванні використано спрощені припущення щодо трафіку, ARQ і накладних витрат, а енергоспоживання оцінено опосередковано. Наступні кроки – включення детальної енергетичної моделі (біт/Дж), дослідження чутливості до похибок оцінювання каналу та швидкої мобільності, розширення на інші схеми модуляції/кодування й багатовантажності MAC, а також валідація на натурних/NS-3 експериментах.

У підсумку, метод є практично придатним для застосувань із жорсткими вимогами до надійності та оперативності (зокрема, моніторинг об'єктів критичної інфраструктури), оскільки забезпечує стійке покращення мережевих метрик без необхідності у додаткових частотних ресурсах.

Список літератури:

1. Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*. 1999. Vol. 10, No. 6. P. 585–595.
2. Foschini G. J. Layered space–time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*. 1996. Vol. 1, No. 2. P. 41–59.
3. Tse D., Viswanath P. *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 564 p.
4. Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 676 p.
5. Heath R. W., Lozano A. *Foundations of MIMO Communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 464 p.
6. Marzetta T. L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2010. Vol. 9, No. 11. P. 3590–3600.
7. Rusek F., Persson D., Lau B. K. et al. Scaling up MIMO: The path to massive MIMO. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2013. Vol. 30, No. 1. P. 40–60.
8. Larsson E. G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T. L. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*. 2014. Vol. 52, No. 2. P. 186–195.
9. Nguyen D. N., Krunz M. A Cooperative MIMO Framework for Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*. 2014. (preprint: University of Arizona). URL: https://wicon.arizona.edu/sites/default/files/2023-03/TOSN2014_diep.pdf
10. Channel capacity improvement for cooperative MIMO wireless sensor networks via adaptive MIMO-SVD. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/310808476_Channel_capacity_improvement_for_cooperative_MIMO_wireless_sensor_networks_via_adaptive_MIMO-SVD
11. Energy-Efficient Cooperative MIMO Formation for Underwater MI-Assisted Acoustic Wireless Sensor Networks. *MDPI (Remote Sensing)*. 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/15/3641>

12. Performance Evaluation of Wireless Sensor Network Based on MIMO Relaying Channel Capacity. IEICE Transactions on Communications. 2009. Vol. E92-B, No. 12. P. 3166–3176.

13. Тимофєєв Є. М., Лисенко О. І. Аналітичний огляд підходів до застосування технології MIMO для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Одеса: Вид. дім «Гельветика», 2025. Т. 36 (75), № 3. (Прийнято до друку). URL: <http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive>

14. Тимофєєв Є. М., Лисенко О. І. Застосування технології MIMO для підвищення ефективності функціонування мобільних сенсорних мереж. Матеріали XIX МНТК «Перспективи телекомунікацій» (ПТ-2025). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 308–311. ISSN 2663-502X (print), 2664-3057 (online).

15. Сушин І. О., Лисенко О. І., Тимофєєв Є. М. Математична модель підтримки зв'язності мобільної мережі сенсорів спрямованої дії з телекомунікаційними аероплатформами дворівневого розташування. Матеріали XIX МНТК «Перспективи телекомунікацій» (ПТ-2025). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 66–69. ISSN 2663-502X (print), 2664-3057 (online).

Tymofeiev Ye.M., Lysenko O.I. METHOD OF USING MIMO TECHNOLOGY TO INCREASE THE BANDWIDTH OF MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS

The article is devoted to a comprehensive method for significantly increasing the throughput and reliability of mobile wireless sensor networks (MWSNs) by integrating advanced multiple-input multiple-output (MIMO) technology into both the access and transport subsystems. The object of study is MWSNs with mobile sensor nodes that operate under strict energy and bandwidth constraints and limited radio resources; the subject is the methodology of combining spatial multiplexing, diversity techniques, and adaptive beamforming with flexible network parameter control. The publication summarizes the theoretical prerequisites for applying MIMO in MWSNs, formalizes the requirements for channel and traffic models, defines the initial simulation parameters (fading models, packet lengths, bit rates, node mobility scenarios, interference patterns), and presents possible spatial configurations (2×2, 2×4, 4×4, as well as cooperative or virtual MIMO for single-antenna nodes).

The methodological framework covers algorithms for accurate channel state estimation (Least Squares, Minimum Mean Square Error, Recursive Least Squares, and Kalman filtering), adaptive modulation and coding strategies, as well as dynamic switching between multiplexing and diversity transmission modes depending on SNR, interference level, and specific mobility characteristics of the nodes. In addition, mechanisms for spatial separation of simultaneous users and recommendations for configuring medium access protocols under conditions of variable node density are provided. A comparative simulation experiment is included to evaluate network performance in terms of end-to-end route throughput, average packet delay, packet error probability, and energy efficiency across different network topologies, while also analyzing the effect of node movement speed on service quality under quasi-mobility scenarios that are highly relevant for real-world deployments.

The proposed research structure emphasizes reproducibility and transparency: all modeling steps, simulation parameters, input datasets, and output formats will be presented in the form of open-source scripts, detailed instructions, and graphical results, which facilitates independent validation, peer review, and future extensions by other researchers. The practical value of the work lies in the possibility of applying the developed methodology in a wide spectrum of engineering domains – from industrial monitoring, intelligent transport systems, and smart city infrastructure to environmental protection, public safety, and the resilience of critical infrastructures. Moreover, the results can serve as a solid methodological foundation for designing next-generation protocols and architectures of mobile sensor networks with integrated MIMO support, ensuring scalability, adaptability, and long-term technological relevance.

Key words: MIMO, mobile wireless sensor networks, capacity, traffic optimization, dynamic network control, link reliability, spatial multiplexing, critical conditions.

Дата надходження статті: 28.08.2025

Дата прийняття статті: 12.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Tsybal O.V.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Antoniuk O.I.

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

SPREAD SPECTRUM MODULATION TECHNIQUE INVESTIGATION FOR PLL LESS CLOCK GENERATOR USING MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

Electromagnetic interference (EMI) is a major design challenge in modern communication and embedded systems. Spread spectrum clock generation (SSCG) reduces peak EMI by spreading energy over a wider band via intentional, low-rate frequency modulation.

This paper presents the analytical foundations of SSCG, including detailed mathematical derivations for triangular and Hershey–Kiss (HK) modulation profiles and analyzes of main parameters that have impact on performance of EMI reduction.

To verify analytical approaches Matlab/Simulink model for spread spectrum clock generation system was developed. The model is based on approach of RC-based relaxation oscillator to which modulation signal applied. Developed model allow quickly evaluate commonly used modulation profiles (triangular, piecewise linear, Hershey-Kiss) and influence of modulation frequency, depth on EMI reduction level. To comply standards EMI receiver model is used for evaluation spectra of modulated signal. Accurate evaluation of electromagnetic interference (EMI) is essential for ensuring compliance with international standards such as CISPR, ISO, and FCC. While simple FFT-based spectrum analysis can provide a general view of signal spectra, it lacks the precision, repeatability, and standard-compliance required for EMI testing.

Comparative simulations of spectra for different modulation profiles shows that Hershey-Kiss profile the most effective, but require complex implementation in real hardware. Piecewise linear profile typically achieves greater peak reduction than linear triangular modulation at equal spread depth and modulation rate, while maintaining moderate level of complexity for implementation. The proposed model enables fast pre-silicon evaluation of SSCG parameters, offering guidelines for selecting optimal modulation strategies to balance EMI performance, implementation complexity, and regulatory compliance.

Key words: EMI, spread spectrum, SSCG, triangular modulation, Hershey-Kiss modulation, piecewise linear profile, EMI receiver.

Formulation of the problem. Electromagnetic Interference (EMI) is defined as emission from a device or a system that interrupt normal operation of the own or neighbor system. Emission could either being radiated (i.e. propagated through space) or conducted (i.e. propagated through a wires of ground, power or signal). EMI has become one of the most critical challenges in modern electronics and communication systems. As devices become faster, denser, and more integrated, they emit stronger harmonic components, increasing the risk of interference with nearby systems. The industry, therefore, faces the dual challenge – keep high data integrity and mitigate

EMI to meet stringent regulatory standards for safety and performance.

EMI-related problems have received nowadays considerable attention, as proven by the presence of many international regulations, such as International Electrotechnical Commission (IEC), Society of Automotive Engineers (SAE) and the International Organization for Standardization (ISO) which are automotive Electromagnetic compatibility (EMC) standards [1]. Special Committee on Radio Interference (CISPR) 25 standard is to ensure that receivers used in vehicles such as boats and internal combustion engines are protected with compliance [2].

According to these regulations, EMC is meaning: the ability to fit the power spectrum of any interfering signal radiated/conducted by a circuit/system under a prescribed level; the ability of a circuit/system to be immune to incoming electromagnetic interference at a given level. In other words, any electronic equipment must not generate EMI above specified level, and must be not susceptible to EMI if it's below specified level. From stated above, the role of EMI source is not limited just to high power circuits and power transmission lines, but applicable for all circuits that have a non-negligible switching activity (for example any digital circuits have this switching activity). At the same time, this circuits are susceptible to interference, which can comprise signal integrity and even destroy correct application of circuit or system.

Classic and general purpose approaches for EMI reduction are about reduction between source and victim with shielding [3] or filtering [4]. Nevertheless, in many situations these approaches are not applicable, especially for mixed-mode and system-on-chip circuits, as in this case source and victim belong to the same integrated circuit [5, 6]. In this case, layout strategies can be applied to mitigate EMI, but all of them are case specific including particular applications.

A promising approach to addressing this issue is the use of spread spectrum modulation techniques, also known as dithering or spread spectrum clocking, firstly proposed in early 90s [7]. This technique can be applied to any circuit, that consist of non-negligible switching activity, such as digital circuits, switching power converters, communication protocols and can significantly reduce power density of transmitted signals, minimize potential for interference with other electronic systems. By deliberately spreading the signal's spectral energy over a wider frequency band, spread spectrum modulation reduces peak emission levels and ensures better compliance with EMI standards – without requiring additional hardware filtering. This capability is particularly important in the automotive sector, where the dense and complex electronic environment can exacerbate the effects of EMI. Robust, EMI-resistant communication is essential for advanced driver-assistance systems (ADAS), infotainment, and other critical vehicle functions. Using spread-spectrum modulation to improve EMI performance is both a practical necessity and a driver of technological advancement: it delivers more reliable in-vehicle data transfer and deepens the scientific basis of EMI mitigation, ultimately improving safety, efficiency, and the user experience.

Another problem is that design of spread spectrum clock generator (SSCG) not trivial task. The relationship between modulation profile, deviation (depth), and rate on one side, and the measured EMI reduction under CISPR receiver settings (resolution bandwidth, detector type) plus the induced timing/jitter penalties on the other, is highly nonlinear and platform-dependent. Therefore, a reproducible, configurable clock-generator model with spread spectrum is needed to support multiple modulation profiles (triangular, sinusoidal, Hershey-Kiss, random) and center/down/up spread modes. Also possibility to map time-domain parameters to frequency-domain compliance metrics (peak/quasi-peak vs. resolution bandwidth) and signal-integrity metrics (period and cycle-to-cycle jitter) is important during development cycle. Finally yet importantly, benefit from model is ability to enable pre-silicon exploration of EMI vs. timing trade-offs for different communication protocols. Such a model reduces hardware iteration risk, accelerates standards compliance, and yields practical guidelines for selecting SSCG parameters in required data-transmission systems.

Analysis of recent research and publications.

In recent years, spread spectrum techniques have been used in many applications to improve electromagnetic interference (EMI), such as class D amplifiers [8], microprocessor clock generators [9], LCD display panels [10]. Also this technique has been adopted in lot of communication protocols like Serial ATA, Display Port and PCI Express.

Won-Young Lee and Lee-Sup Kim [11] propose a spread spectrum clock generator for DisplayPort main link. Their solution based on PLL implementation with two possible frequencies of operation, with controllable spreading of output frequency, but frequency of modulation fixed on 33kHz. And also modulation depth is limited.

Hyuk Ryu et al. [12] presents a fractional N phase-locked loop based spread spectrum clock generator (SSCG) using programmable linear frequency modulator. The SSCG provides a programmable frequency deviation and modulation frequency with triangular profile regardless of its operation frequency. The ranges of frequency deviation ratio and modulation frequency are 0-80% and 0-100kHz, and operation frequency configurable from 400MHz to 2GHz. The proposed solution support serial-link standards such as SATA, Display Port, PCI Express and can be applied to various switching circuits such as Class-D power amplifiers or switching converters.

Ray A. et al. introduce an active EMI cancellation technique that achieves a significant reduction in con-

ducted EMI of LIN drivers, demonstrating the effectiveness of active methods in automotive contexts [13]. The proposed active EMI cancellation circuit synthesizes a phase synchronized cancellation pulse which is then injected onto the LIN driver output using an on-chip tunable capacitor array to cancel the switching noise injected via substrate. The proposed EMI reduction technique can track and cancel substrate noise independent of process technology and device parasitics, input voltage, duty cycle and loading conditions of the DC-DC switching regulator.

Minyoung Song et al. [14] propose piecewise linear modulation profile that can significantly reduce EMI with relatively simple implementation. The proposed solution based on PLL with sigma-delta modulator to provide spread spectrum modulation. Output frequency is fixed for 2 cases, modulation frequency and depth also have just few fixed options.

In-Young Lee et al. [15] presents a robust spur reduction technique using a switched-capacitor feedback differential phase-locked loop (PLL) and a delay-locked-loop (DLL)-based spread-spectrum clock generation in a UHF-band RF identification transmitter (TX). The proposed differential PLL is characterized by adopting a switched-capacitor common-mode feedback and distributed varactor biasing scheme to the differential charge pump and voltage-controlled oscillator designs, respectively, which results in down to 94 dBc in reference spur rejection with all digital parts off. Additionally, by adopting an 8-bit DLL and Hershey-Kiss modulated profile together, the proposed spread-spectrum clock generator shows more than 20-dB electromagnetic-interference reduction while providing up-, down-, and center-spread modes.

Hong-Yi Huang et al. [16] proposed a PLL-less realization of spread spectrum clock generator with triangular profile. The problem here – relatively low frequency of operation, 65kHz, that is not relevant for most modern applications.

Mei-Ling Yeh et al. [17] proposed relaxation oscillator architecture with dual sawtooth modulation profile.

X. Wu et al. [18] presents also relaxation oscillator, but charging and discharging current of oscillator change randomly in the set range, which allow to get better EMI reduction. Also proposed solution has option of configuration of output frequency and modulation depth.

Another important part of investigation is a developing model for spread spectrum clock generation systems for fast evaluation performance of EMI reduction and developing and checks of new modula-

tion profiles and parameters. W. A. Ayoub et al. [19] describes a developed Simulink model for PLL based SSCG with sigma delta modulator that provides triangular modulation profile. Model allows to configure modulation profile's parameters such as depth, frequency and evaluate impact of them on EMI reduction level.

S. Rajamanickam et al. [20] propose MATLAB based program for spread spectrum modulation technique evaluation with several modulation parameters, profiles, including test measurement setup in EMI analysis for DC-DC converters.

Selection of previously unresolved parts of the general problem. Despite the fact that spread spectrum technique topic already well studied, there remains a need for further research to develop spread spectrum clock generation system with architecture that allow different configuration of output frequency, modulation profiles and parameters. The studies mentioned above highlights that for fast protocols, spread spectrum clocking is typically integrated with PLL. However, it's challenging due to fact that PLL bandwidth must be carefully designed to avoid jitter amplification. It's also require advanced digital control loops, carefully balancing between EMI reduction and signal integrity. All of this come to high complexity of overall system.

For slower communication protocols like SPI, I2C, RS-232, RS-485, CAN, LIN the constraints are less strict, which give more freedom in developing spread spectrum clock generator. Lower operating frequencies in range of tens of MHz, give opportunity to develop fully analog solution with configurable profile, depth, frequency of modulation. And from literature study this part of topic not covered well.

Another problem that require additional investigation is in need to develop well defined model of oscillator that reflect real architecture of clock generator including part that is responsible for spread spectrum modulation.

The purpose of this article is to investigate the effectiveness of different modulation profiles and their parameters in spread spectrum modulation technique and their impact on EMI performance. The article seeks to identify the optimal parameters for spread spectrum techniques that can reduce electromagnetic interference while maintaining low complexity of implementation.

To achieve this aim, the article sets the following *objectives*:

1. Conduct a review of current methods and approaches to spread spectrum techniques used to mitigate EMI in data transmission systems.

2. Identify most commonly used modulation profiles and their parameters, and analyze their impact on EMI reduction level.

3. Develop a model of clock generator with configurable spread spectrum modulation that mimic real operation of oscillator and include EMI measurement unit according to standards.

4. Perform modeling and experimental studies to assess the impact of various modulation profiles and parameters on EMI performance.

5. Analyze the obtained results and provide recommendations for the optimal selection of spread spectrum modulation profiles and parameters depending on requirements.

Basic principles of spread spectrum modulation technique. Any digital circuits or switching converters have narrow-band characteristics of the spectrum of their typical signals, for which energy mainly located around fundamental tone and its harmonics. Spread spectrum techniques reduce EMI by lowering the power of main tone at the cost of adding additional spectrum components in some frequency band. This is achieved by introducing in time domain a controlled jitter in the reference clock signal by changing instantaneous working frequency (Figure 1).

Modulation is the process of modifying the characteristics of a carrier wave by another signal to achieve certain advantages. This process is widely used in telecommunications for information transmission. The carrier characteristics that are modulated usually include amplitude and/or angle (phase or frequency). A simple modulator can vary the carrier's characteristics in proportion to the modulating waveform (analog modulation). More sophis-

ticated modulators first convert the modulating signal into a digital format and encode it (digital modulation). The modulator can be represented as a "black box" with three inputs and one output (Fig. 2).

In the modulation process three signals and one parameter are involved:

- Carrier frequency $f_c(t)$: a periodic waveform with constant frequency f_c and a constant amplitude profile;
- Modulating signal $\xi(t)$: the waveform responsible for changing (modulating) the original constant characteristics of the carrier;
- Δf_c : parameter; which response for frequency deviation;
- Modulated output signal $F(t)$: the waveform that results from the modulation process.

As a result output modulated signal $F(t)$ can be represented as follow:

$$F(t) = A_0 \cos \left(2\pi f_c t + 2\pi \Delta f_c \int_{-\infty}^t \xi(\tau) d\tau \right) \quad (1)$$

where f_c – carrier frequency;

Δf_c – carrier frequency deviation;

A_0 – amplitude of the signal;

$\xi(t)$ – normalized driving signal, $-1 \leq \xi(t) \leq 1$.

The power of $F(t)$ is unchanged with respect to unmodulated signal power and equal to $\frac{A_0^2}{2}$, and it is approximately consists of in the Carson's² bandwidth [21] (2):

$$B = 2 \cdot f_m \cdot (1 + m_f) = 2 \cdot (\Delta f_c + f_m) \quad (2)$$

where f_m – frequency of modulating signal;

m_f – modulation index.

Modulation index is defined as ratio of carrier frequency deviation to frequency of modulating signal (3):

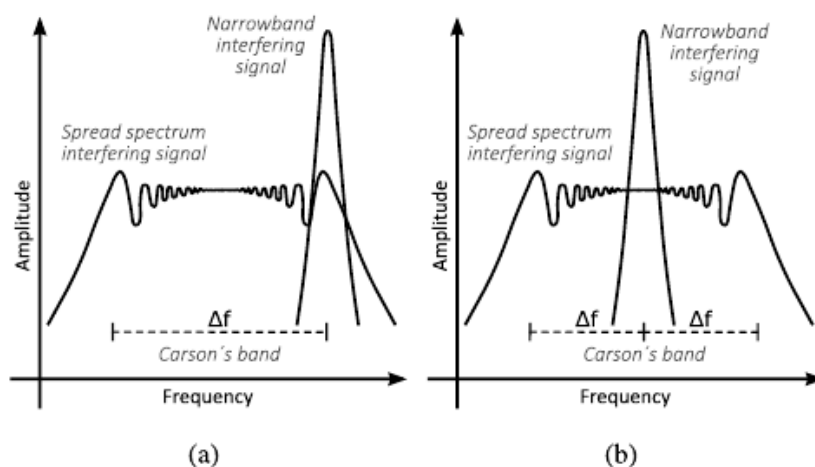


Fig. 1. Illustration of comparison between the power spectra of an unmodulated narrow-band interfering signal and of a spread spectrum modulated one: a – down-spread modulation; b – center-spread modulation

$$m_f = \frac{\Delta f_c}{f_m}, \quad (3)$$

Also important parameter that characterize spread spectrum modulation is modulation depth or modulation coefficient (4):

$$\delta = \frac{\Delta f_c}{f_c} \text{ (or } \delta\% = \left(\frac{\Delta f_c}{f_c}\right) \cdot 100) \quad (4)$$

For fast link communication protocols like SATA, Display Port or PCI Express modulation depth is not more than 2.5% typically due to high timing requirements at high data rate. But for slower communication protocols this parameter could be bigger up to 10-15%, which is increase a performance of EMI reduction.

Considering square signal to which frequency modulation applied, it's equal to applying (1) to each signal harmonics, taking into account that the n th harmonic is spread within the bandwidth of amplitude $2n\Delta f_c$.

Modulation index m_f define spread of spectrum and amplitude of carrier frequency power. Assuming modulation index is small ($m_f = \Delta f_c \cdot T_m$), only a few among of the resulted components are part of spectrum bandwidth which is interested. From other side, when modulation index is large, the resulted spec-

trum of $F(t)$ has many components very close to each other in Carson's bandwidth, which is better for EMI reduction. But in practical implementation there are limitations for minimum and maximum modulation frequency and modulation depth.

For the frequency modulation reduction in EMI could be expressed as [22]:

$$\gamma = -10 \log \omega_c + 10 \log \omega_m - 10 \log \delta + 3(\text{dB}) \quad (5)$$

From (5) EMI reduction coefficient depend on carrier frequency ω_c , modulation frequency ω_m , and modulation depth δ .

The key parameter that determines the shape of the resulting modulated spectrum is closely tied to the modulation profile, i.e., the waveform used for modulation. In practice, three profiles are commonly used for modulation: sinusoidal, triangular (including modifications of it like sawtooth or piecewise linear), and exponential, also known as Hershey-Kiss. (fig. 3) [23].

In table 1 mathematical representation of commonly used profiles are presented.

The latter provides a very flat spectral characteristic, maximizing harmonic suppression. Sinusoidal modulation is simpler to analyze but not optimal. A

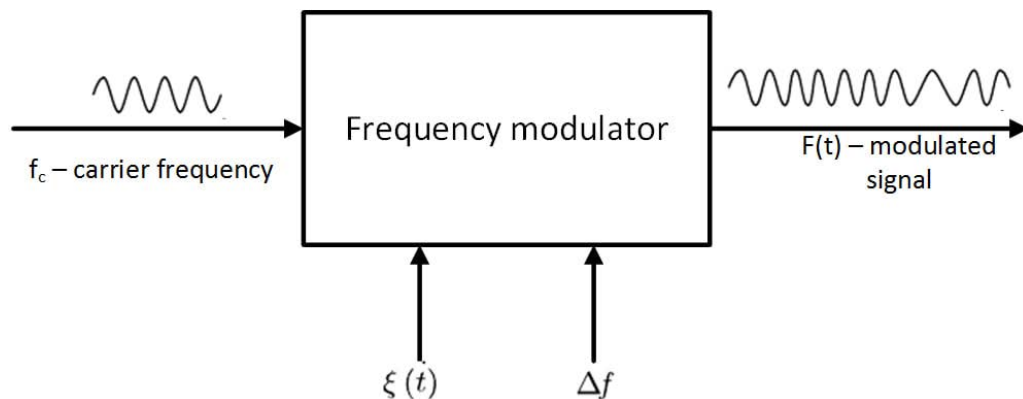


Fig. 2. Model of the frequency modulator

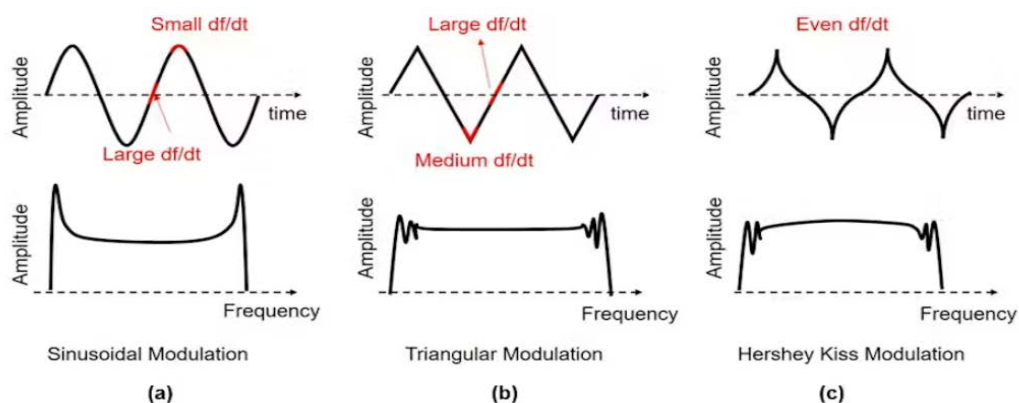


Fig. 3. Modulation profiles representation and their power spectrum

Table 1

Sinusoidal, triangular and exponential modulation profiles mathematical representation, where f_m and T_m are the modulating signal frequency and period, respectively

Sinusoidal	Triangular (with symmetry index, k_T)	Exponential (with concavity coefficient, p)
$\xi(t) = \sin(2\pi f_m t)$	$\xi(t) = \begin{cases} \frac{2}{k_T} * f_m t, & 0 \leq t \leq \frac{k_T T_m}{2} \\ \frac{1}{1-k_T} * (1-2f_m t), & \frac{k_T T_m}{2} \leq t \leq (1-\frac{k_T}{2}) * T_m \\ \frac{2}{k_T} * (f_m t - 1), & (1-\frac{k_T}{2}) * T_m \leq t \leq T_m \end{cases}$	$\xi(t) = \begin{cases} \frac{1}{e^{p/4}-1} * (e^{pt} - 1), & 0 \leq t \leq \frac{T_m}{4} \\ \frac{1}{e^{p/4}-1} * (e^{p/2} * e^{-pt} - 1), & \frac{T_m}{4} \leq t \leq \frac{T_m}{2} \\ \frac{1}{e^{p/4}-1} * (1 - e^{-p/2} * e^{pt}), & \frac{T_m}{2} \leq t \leq \frac{3T_m}{4} \\ \frac{1}{e^{p/4}-1} * (1 - e^{p/4} * e^{-pt}), & \frac{3T_m}{4} \leq t \leq T_m \end{cases}$

triangular waveform is often used as a good compromise. Triangular profile is the simplest and most common SSCG profile: the clock frequency ramps linearly from a minimum to a maximum, then linearly back, spreading harmonic energy over a wider band and lowering peak amplitudes. It's easy to implement, yields a relatively uniform spread, and is widely used to cut EMI from system clocks. A skew parameter k_T (0–1) shifts the break point within the half-period, allowing a seamless transition from symmetric triangle to sawtooth.

Exponential or Hershey-Kiss profile is more complex than triangular/sawtooth. The slope is shallow near the center frequency and steeper at the band edges, pushing more dwell toward the edges to better disperse high-harmonic energy. Variants such as Hershey-Kiss typically deliver the largest peak EMI reduction and a more even energy distribution, but they're harder to realize due to the required nonlinear modulation (specialized circuitry or DSP).

Matlab/Simulink model implementation and simulation. As mentioned above, spread spectrum modulation have different parameters and modulation profiles. During design phase it is important to have a quick check of influence of selected parameters for performance of systems and also a level of EMI reduction. For this purpose the model in which parameters can be tuned and evaluated quickly is needed.

As a core of oscillating block the relaxation RC based architecture is selected. The block diagram is showed on Fig. 4 [24].

This solution is easy to implement, not sensitive to element mismatch and allow changing operation frequency simply by changing RC time constant. Also this oscillator selected as reference for investigation of spread spectrum technique due to possibility to implement frequency modulation without effort, just by modifying bias current, that set reference frequency.

This oscillator consists of startup circuitry (which can be ignored for now), bias current generator, integrator, voltage-to-current converter, current comparison circuit and some output logics with latch.

Proposed model, implemented in Matlab/Simulink shown on Fig. 5. In this model to guarantee RC-only frequency choose the V-to-I and bias scaling so that the current comparator trips exactly when V_{INT} reached a fixed V_{GS} -equivalent, and make that “fixed” cancel via device matching. In model this can be done by setting Voltage-to-current converter gain $k_{VI} = I_B/V_{th}$. To set carrier frequency the value of IB2 and IB3 blocks, which are references for current comparators, should be set to proper value. Also model has spread spectrum modulation, which is implemented by block “Modulator”. This block implement frequency modulation as described in (1). Modulation profiles generated by Matlab script and can be easily configured. In the developed model added EMI Receiver model [25] due to the fact that EMI levels should be measured according to standards [2]. Using a dedicated EMI receiver instead of a simple FFT analysis is crucial when measuring electromagnetic interference in

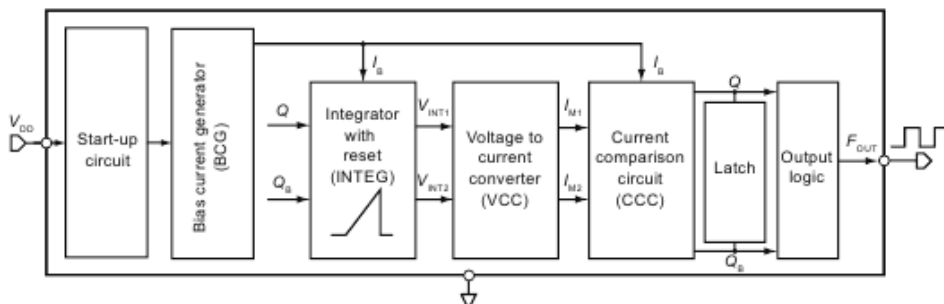


Fig. 4. Block diagram of RC based relaxation oscillator

compliance with international standards (e.g., CISPR, ISO, FCC). Unlike a basic FFT spectrum analyzer, an EMI receiver provides: standard-compliant measurements – EMI receivers implement specific detector types (peak, quasi-peak, and average) and resolution bandwidths required by standards, while FFT cannot replicate these accurately; better dynamic range and sensitivity – EMI receivers are optimized to detect very low-level emissions even in the presence of strong neighboring signals; preselection filtering – they include hardware filters to suppress out-of-band signals, preventing measurement errors common in FFT-based approaches; repeatability and certification readiness – results from EMI receivers are accepted in official compliance testing, while simple FFT data is often insufficient for regulatory approval.

In developed model modulation profile could be configurable to triangular with different value of symmetry index k_T , Hershey-Kiss, piecewise linear. Also

in model easy to adjust carrier frequency f_c , modulation frequency f_m , modulation depth δ and modulation index m_f . To be complaint with standards EMI Receiver model added. Proposed model of oscillator could be easy portable to schematic as it's mimic real operation. Also model could be improved to reflect parasitic effects, like noise, delays, element mismatch.

The developed model was verified at frequency of 4MHz. For doing that capacitance value, that sets a frequency, was selected $C_{\text{ramp}} = 500\text{fF}$. From RC-time constant value for resistance was calculated as 250kOhms. Threshold voltage was selected 0.7V, because real values of threshold voltages for MOS and bipolar transistors are in this range. As a result calculated value of bias current I_B equal to 2.8uA, and voltage to current converter gain k_{VI} equal to 4 uA/V.

The setup of EMI receiver model was done accordingly to standard [2]. Resolution bandwidth

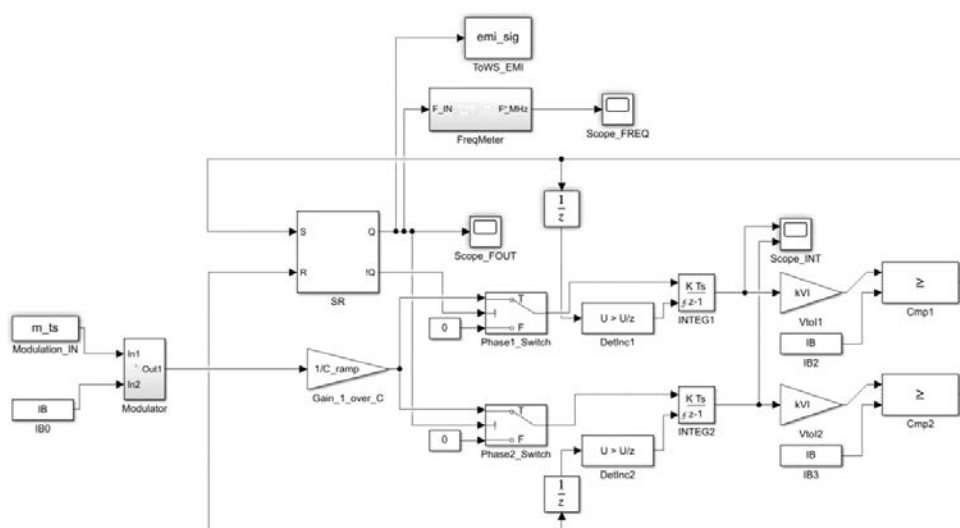


Fig. 5. Proposed model of oscillator including spread spectrum modulation

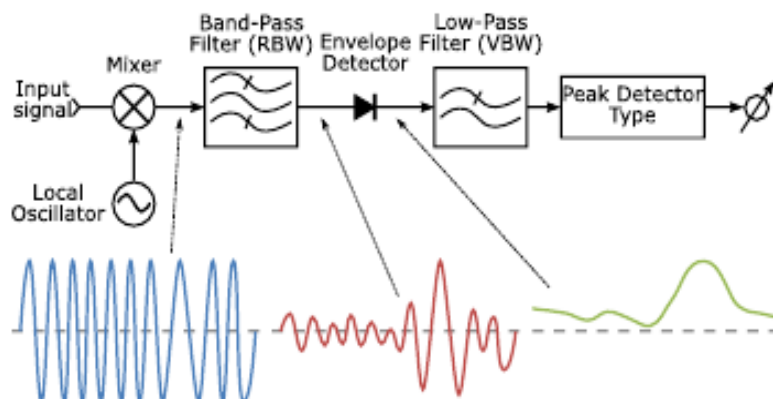


Fig. 6. Simplified block diagram of an analog spread spectrum analyzer (EMI receiver)

(RBW) was set to 9kHz, frequency band adjusted from 33kHz to 30MHz as specified. Frequency step was selected as 1kHz just to have enough resolution and as a compromise between simulation time and accuracy.

The simulation results of developed model of spread spectrum generation clock system are illustrated on figures 7-10. On figure 7 the spectrum of non-modulated clock signal is shown.

From this figure we see narrow-band carrier signal at frequency 4MHz and its harmonics. On carrier frequency the magnitude of signal is approximately -1dB, this is due to fact that EMI Receiver has built-in low-pass filter.

On the figure 8 a spectrum of modulated by triangular profile signal is shown. The symmetry index of k_T is selected as 0.5, which is equal to normal

triangular wave. Modulation depth is selected as 10%, modulation frequency f_m equal 10kHz, and as a result modulation index m_f equal to 40. Resulted signal spectrum shows flat spectrum around Carson's bandwidth, with magnitude -16.7dB, which equal to EMI reduction level, with this modulation profile and parameters. Also reduction of magnitude could be seen at the harmonics.

On the figure 9 a spectrum of modulated by piecewise linear profile signal is shown. The symmetry index of k_T is selected as 0.5. During rising edge three different slopes applied, which is configured inside model and could be adjusted, falling edge is symmetrical. All other parameters keep the same. With this modulation profile and parameters, resulted signal spectrum shows not so flat spectrum around Carson's bandwidth, but peak reduction is around 17dB, with even more reduc-

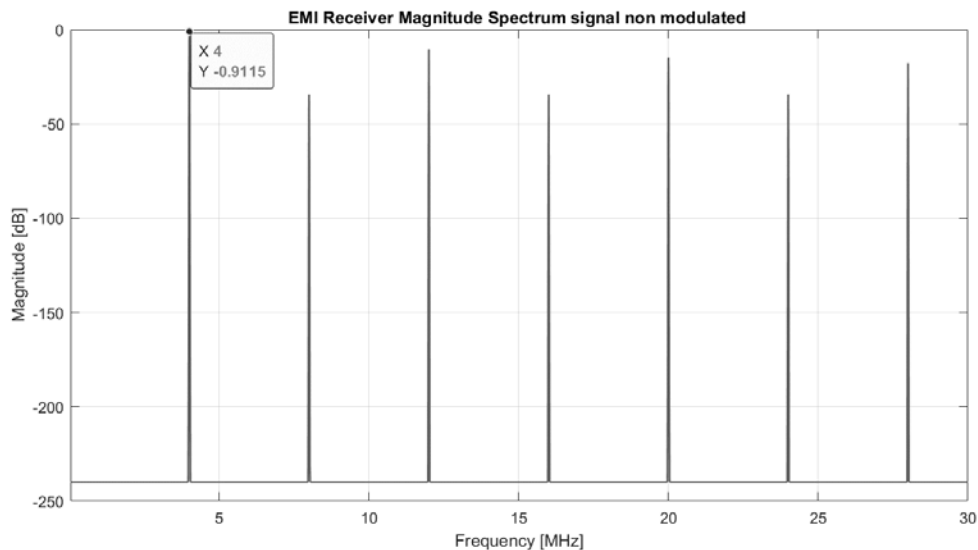


Fig. 7. Spectrum of non-modulated signal after EMI Receiver

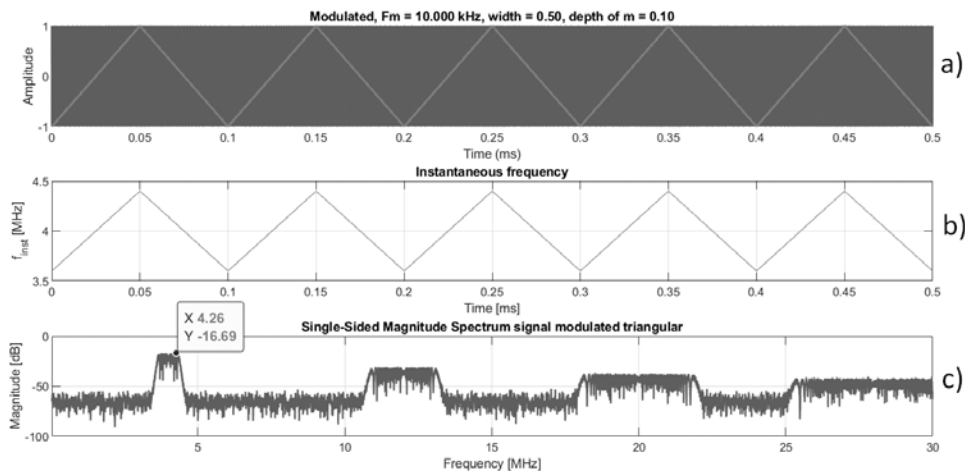


Fig. 8. Modulated by triangular profile with symmetry index 0.5 resulted signal: a) resulted and modulation signals in time domain; b) instantaneous frequency of modulated signal in time domain; c) resulted spectrum after EMI receiver

tion at carrier frequency up to -20dB. Also reduction of magnitude could be seen at the harmonics.

On the figure 10 a spectrum of modulated by Hershey-Kiss profile signal is shown. The envelope coefficient p is selected as 6, but could be configured inside model and could be adjusted. All other parameters keep the same. With this modulation profile and parameters, resulted signal spectrum shows the most flat spectrum around Carson's bandwidth, peak level reduction is -17.2dB, and at the carrier frequency reduction level achieve around -20dB level.

All of the performed simulations show expected theoretical behavior and look promising in terms of mitigation EMI.

The resulted behavior with performance metrics are summarized in table 2. Taking in to account complexity of realization of Hershey-Kiss modulation profile, which require complex digital control circuits, piecewise linear modulation profile looks promising to implement in spread spectrum clock generation systems, as performance in reduction EMI level is comparable with Hershey-Kiss profile. But for some application triangular profile could also be implemented, as doesn't require complex circuits for generating modulation signal.

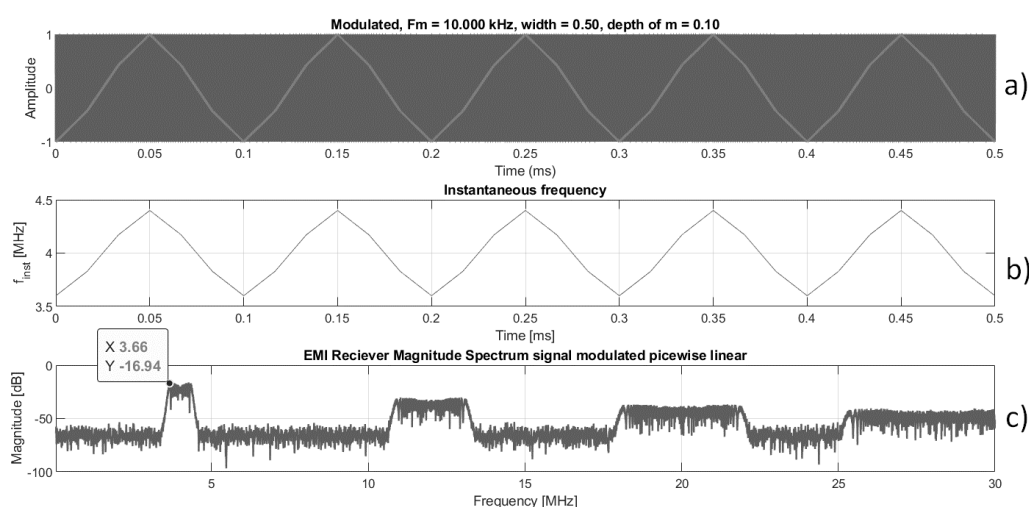


Fig. 9. Modulated by piecewise linear profile with symmetry index 0.5 resulted signal: a) resulted and modulation signals in time domain; b) instantaneous frequency of modulated signal in time domain; c) resulted spectrum after EMI receiver

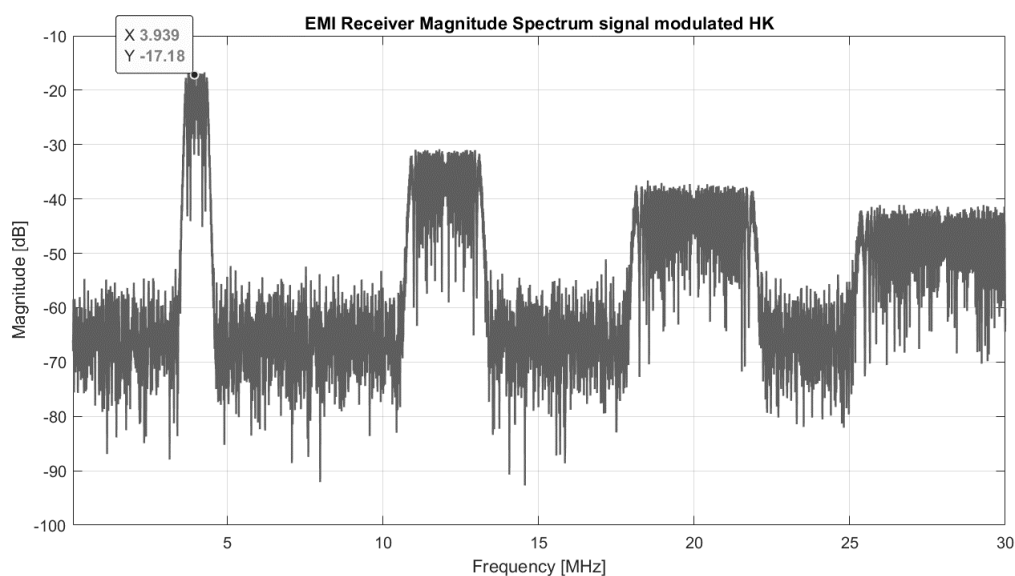


Fig. 10. Modulated by Hershey-Kiss profile with concavity coefficient equal to 6 resulted signal

Table 2

EMI reduction level for triangular, piecewise linear and Hershey-Kiss modulation profiles in spread spectrum clock generator

Modulation shape	Peak EMI Reduction	Complexity of implementation
No modulation	~ -1 dB	Basic
Triangular	-16.7 dB	Low
Piecewise linear	-20 dB	Medium
Hershey-Kiss	-20 dB	High

Conclusions. In conducted study the use of spread spectrum modulation technique is investigated in terms of improvement electromagnetic compatibility performance in data transmission systems. It could be stated that it's promising approach with significant potential to enhance the reliability and efficiency of modern communication systems. By expanding the signal spectrum, the power density of the transmitted signal is reduced, minimizing the likelihood of interference with other electronic systems.

The theoretical basic principles of spread spectrum modulation were analyzed and main parameters were derived. It can be stated, that level of reduction in EMI depends on modulation profile type, modulation frequency and depth.

Theoretical results were proved by model in Matlab/Simulink environment. Developed model

for spread spectrum clock generation system allow to predict EMI levels and compare performance for different modulation profiles with adjustable parameters. This is useful during developing real system to make fast exploration of spread spectrum modulation parameters and achieve required levels of EMI suppressions.

From the conducted simulations, it could be stated that Piecewise linear modulation profile looks like the most optimal for hardware implementation as it gives uniform spectrum in Carson's bandwidth and peak level of reduction up to -20dB simultaneously have moderate level of complexity for implementation comparing to Hershey-Kiss profile, which is comparable in terms of performance, but require much more complex implementation in hardware.

Further study could be aimed to firstly optimize parameters for piecewise linear modulation profile. Also model of oscillator could be improved in terms of different parasitic effects that present in hardware implementation like noise, propagation delays, component mismatches. Lastly more complex modulation profiles could be added to model for further investigation of performance in EMI reduction. Random and pseudo random modulation profiles look promising in terms of investigation using developed model.

Bibliography:

1. Code of Federal Regulations 47 (47CFR), Part 15, Subpart B: Unintentional Radiators. URL: <http://www.ecfr.gov/> (дата звернення: 01.09.2025).
2. CISPR 25:2021: Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64645> (дата звернення: 01.09.2025).
3. Li M., Nuebel J., Drewniak J., Dubroff R., Hubing T., Van Doren T. (2000). EMI from cavity modes of shielding enclosures – FDTD modeling and measurements. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2000. Vol. 42. P. 29–38. DOI: 10.1109/15.831702.
4. Hartmann M., Ertl H., Kolar J.W. (2011). EMI filter design for a 1 MHz, 10 kW three-phase/level PWM rectifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011. Vol. 26, № 4. P. 1192–1204. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2070520.
5. Sudo T., Sasaki H., Masuda N., Drewniak J.L. (2004). Electromagnetic interference (EMI) of system-on-package (SOP). *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2004. Vol. 27, № 2. P. 304–314. DOI: 10.1109/TADVP.2004.828817.
6. Ramdani M., Sicard E., Boyer A., Ben Dhia S., Whalen J., Hubing T., Coenen M., Wada O. (2009). The electromagnetic compatibility of integrated circuits – past, present, and future. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2009. Vol. 51. P. 78–100. DOI: 10.1109/TEMPC.2008.2008907.
7. Lin F., Chen D.Y. (1994). Reduction of power supply EMI emission by switching frequency modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1994. Vol. 9, № 1. P. 132–137. DOI: 10.1109/63.285504.
8. Ming X., Chen Z., Zhou Z.-k., Zhang B. (2011). An advanced spread spectrum architecture using pseudo-random modulation to improve EMI in class D amplifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011. Vol. 26. P. 638–646. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2063440.
9. Chang H.-H., Hua I.-H., Liu S.-I. (2003). A spread-spectrum clock generator with triangular modulation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2003. Vol. 38, № 4. P. 673–676. DOI: 10.1109/JSSC.2003.809521.
10. Kim M.-W., Kim D.-W., Koo B.-S., Kim Y.-B., Choi O.-S., Kim N.-D. (2009). Chip level techniques for EMI reduction in LCD panels. *Proceedings of the 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Zurich, Switzerland, Jan. 2009. P. 441–444. DOI: 10.1109/EMCZUR.2009.4783485.

11. Lee W.-Y., Kim L.-S. (2011). A spread spectrum clock generator for DisplayPort main link. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2011. Vol. 58. P. 361–365. DOI: 10.1109/TCSII.2011.2149670.
12. Ryu H., Park S., Sung E.-T., Lee S.-G., Baek D. (2015). A spread spectrum clock generator using a programmable linear frequency modulator for multipurpose electronic devices. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2015. Vol. 57. P. 1447–1456. DOI: 10.1109/TEMC.2015.2442618.
13. Ray A., et al. (2022). An active EMI cancellation technique achieving a 25-dB reduction in conducted EMI of LIN drivers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2022. Vol. 69, № 9. P. 3829–3840. DOI: 10.1109/TCSI.2022.3187068.
14. Song M., Ahn S., Jung I., Kim Y., Kim C. (2013). Piecewise linear modulation technique for spread spectrum clock generation. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2013. Vol. 21. P. 1234–1245. DOI: 10.1109/TVLSI.2012.2210290.
15. Lee I.-Y., Kim S., Lee S.-S., Choi J., Ko J., Lee S.-G. (2015). Spur reduction techniques with a switched-capacitor feedback differential PLL and a DLL-based SSCG in UHF RFID transmitter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015. Vol. 63, № 4. P. 1202–1210. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2405536.
16. Huang H.-Y., Palencia G.F., Chen D.-K., Huang W.-H. (2015). Triangular modulation using switched-capacitor scheme for spread-spectrum clocking. 2015 IEEE 18th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS). Belgrade, Serbia, 2015. P. 87–90. DOI: 10.1109/DDECS.2015.41.
17. Yeh M.-L., Liou W.-R., Hsieh H.-P., Lin Y.-J. (2010). An electromagnetic interference (EMI) reduced high-efficiency switching power amplifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010. Vol. 25, № 3. P. 710–718. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2035622.
18. Wu X., Yang B., Wei Q., Li P. (2024). Current spread spectrum clock oscillator with adjustable output mode. 2024 International Conference on Electronic Components and Integrated Engineering (ECIE). 2024. P. 70–76. DOI: 10.1109/ECIE61885.2024.10627468.
19. Ashraf Ayoub W., Dessouky M., Sharaf K. (2010). Modeling of spread-spectrum clock generation system using Simulink. *International Conference on Microelectronics : proceedings*, Cairo, Egypt, 2010. P. 88–91. DOI: 10.1109/ICM.2010.5696213.
20. Rajamanickam, Sivanyanam. (2020). Spread spectrum modulation investigation using MATLAB developed tool on automotive DC-DC converter. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. Vol. 9. P. 6631-6639. DOI: 10.30534/ijatce/2020/355942020.
21. H. S. Black, *Modulation Theory*. Bell Telephone Laboratories series. New York, NY, USA: Van Nostrand, 1953. 363p.
22. Xia, T. (2012). Analytic model for spread-spectrum clock generator circuit characterization. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. Vol. 40, №6. P. 617-626. DOI: <https://doi.org/10.1002/cta.746>
23. FAQ on spread spectrum for switching-supply EMI management Part 2: details. URL: <https://www.analogtips.com/faq-on-spread-spectrum-for-switching-supply-emi-management-part-2-details/> (дата звернення: 21.05.2025).
24. H. Asano *et al.* (2016). A fully integrated, 1- μ s start-up time, 32-MHz relaxation oscillator for low-power intermittent systems. *14th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*. Vancouver, BC, Canada. 2016. P. 1-4, DOI: 10.1109/NEWCAS.2016.7604819.
25. MATLAB/Octave function to evaluate time-domain signals according to the measurement bandwidth and average/peak detector of EMI test receivers Virtual EMI test receiver. (Version 1.0.0). A. Bendicks. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/109119-virtual-emi-test-receiver> (дата звернення: 21.05.2025).

Цимбал О.В., Антонюк О.І. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІКИ МОДУЛЯЦІЇ З РОЗШИРЕННЯМ СПЕКТРА ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА ТАКОВИХ СИГНАЛІВ БЕЗ PLL У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK

Електромагнітні завади (ЕМІ) є однією з основних інженерних проблем у сучасних комунікаційних та вбудованих системах. Технологія генерації тактових сигналів із розширенням спектра (SSCG) дозволяє зменшити піковий рівень ЕМІ шляхом розподілу енергії сигналу на ширший частотний діапазон за допомогою навісної низькочастотної модуляції.

У статті представлено аналітичні основи SSCG, включаючи детальні математичні виведення для трикутного та Hershey-Kiss (HK) профілів модуляції, а також аналіз основних параметрів, що впливають на ефективність зменшення ЕМІ. Для перевірки аналітичних результатів було розроблено модель у середовищі Matlab/Simulink на основі RC-релаксаційного генератора з можливістю підключення різних модулюючих сигналів. Створена модель дає змогу швидко оцінювати поширені профілі модуляції (трикутний, кусково-лінійний, Hershey-Kiss) та досліджувати вплив частоти та глибини модуляції на рівень зменшення ЕМІ.

Для відповідності міжнародним стандартам (CISPR, ISO, FCC) у модель інтегровано віртуальний ЕМІ-приймач для точного аналізу спектра модульованих сигналів. Звичайний спектральний аналіз на основі FFT надає лише загальне уявлення про спектр, але не забезпечує необхідної точності, повторюваності та відповідності стандартам.

Порівняльне моделювання показало, що профіль Hershey-Kiss забезпечує найкраще зниження пікових рівнів ЕМІ, але вимагає складної апаратної реалізації. Кульково-лінійний профіль досягає близьких результатів зі значно простішою апаратною реалізацією та перевершує класичну трикутну модуляцію при однакових параметрах розширення спектра.

Запропонована модель забезпечує швидку оцінку параметрів SSCG, пропонуючи практичні рекомендації щодо вибору оптимальних стратегій модуляції для досягнення балансу між ефективністю зменшення ЕМІ, складністю реалізації та відповідністю міжнародним стандартам.

Ключові слова: електромагнітні завади, модуляція розширеним спектром, трикутна модуляція, Hershey-Kiss модуляція, кульково-лінійний профіль, ЕМІ приймач.

Дата надходження статті: 10.09.2025

Дата прийняття статті: 29.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 536.24:533.6.011

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/16>

Баранюк О.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ І ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ В КОНТУРІ ПРИРОДНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ КОТЛА ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ)

У статті розглянуто проблему продовження ресурсу парових котлів теплових електростанцій, які становлять основу промислового енергетичного комплексу України. Об'єктом дослідження є котельний агрегат ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ), зокрема його барабан-сепаратор, що є найбільш технологічно складним і вартісним елементом конструкції. Представлено результати CFD-моделювання процесів генерації пари у кип'ятильних трубах та сепарації водяної пари в просторі барабана, виконаного у безкоштовній студентській версії ANSYS Student. Метою дослідження є визначення об'ємного паровмісту та швидкості пароводяної суміші на виході з екранних труб, а також висоти дзеркала випаровування в барабані, від якої залежить сольовий баланс котлоагрегату. Для верифікації CFD-моделі використано Нормативний метод розрахунку середнього об'ємного паровмісту в контурах природної циркуляції. Відхилення між результатами CFD та аналітичних розрахунків становить 9–18%, що пояснюється як спрощеннями аналітичної методики, так і обмеженнями студентської версії програмного комплексу. CFD-моделювання також дозволило візуально визначити зони фазового переходу та положення дзеркала випаровування, що є критично важливим для забезпечення надійної роботи барабана-сепаратора. Результати верифікації свідчать, що значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємного паровмісту, що визначений за аналітичною методикою знаходяться в межах від 9 до 18%. Такий результат викликаний як припущеннями аналітичної методики так і обмеженнями студентської версії ANSYS. Визначено, що подача пароводяної суміші на дзеркало випаровування як в даній задачі, призводить до значного хвилювання поверхні. З метою запобігання утворення хвиль на поверхні дзеркала випаровування рекомендується двофазну пароводяну суміш подавати під спеціальні конструктивні елементи барабан-сепаратора, дірчасті листи.

Ключові слова: випаровування, природна циркуляція, конвективне кипіння, паливня, котел.

Постановка проблеми. В Україні, досі працюють парові котли радянської доби які давно відпрацювали свій ресурс, але ще здатні виконувати ті задачі для яких вони були спроектовані, тому є необхідність аргументовано подовжити їх ресурс. Котел Е-50-4-435 Г або ГМ-50-1 (з природною циркуляцією паропродуктивністю 48 т/год температурою та тиском перегрітої пари відповідно 435 °С та 4,1 МПа без проміжного перегріву) є одним з таких котлів. Найбільш термонапруженою частиною котельного агрегату, яка має критичне значення для функціонування котла є його барабан-сепаратор. На термонапружений стан цієї конструкції мають суттєвий вплив процеси що в ньому відбуваються. Представлена робота при-

свячена моделюванню параметрів пароводяної суміші, що рухається в контурі циркуляції котельного агрегату ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Барабанні котли працюють за принципом природної циркуляції води, коли різниця густини води та пароводяної суміші зумовлює рух теплоносія між барабаном та нижніми розподільними колекторами через екранні труби, що охолоджують стінки топкової камери. Радіаційний теплообмін між факелом розжарених газів у паливні котла та водою в екранних трубах призводить до інтенсивного утворення бульбашок пари. Ці бульбашки, піднімаючись вгору, потрапляють у барабан, де відбувається їх відокремлення від води в умо-

© Баранюк О.В., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

вах насичення. Процеси випаровування є вкрай складними, оскільки характеризуються нелінійними зв'язками між властивостями рідини та динамікою теплообміну. До того ж ключові параметри, такі як температура перегріву чи момент висихання поверхні нагріву, важко піддаються прямому вимірюванню. Значна кількість чинників ускладнює контроль цих процесів. Зокрема, у циркуляційних контурах можуть виникати різні типи нестійкостей і коливань потоку, що негативно впливають на ефективність та безпеку роботи котлоагрегату. [2].

Розробка математичної моделі для котлів барабанного типу вимагає комбінації нелінійних рівнянь для опису випаровування у вертикальних трубах та розділення фаз у паровому барабані, як показано в [3]. Ці автори досліджували двофазний потік в середині вертикальних труб, тоді як автори [4] представили модель для прогнозування температури вертикальних труб. В роботі [5] автори якої розробили спрощену числову модель процесів випаровування всередині вертикальних труб, враховані такі двофазні режими потоку як однофазна рідина, бульбашковий потік, снірядний потік, кільцевий потік, кільцевий потік із захопленням, крапельний потік та однофазний потік пари. Проте, в моделі [5] визначаються лише температурні поля в рідинній області (рідина або двофазна суміш) та твердій області (стінка труби). У цій моделі використовуються аналітичні формули, які дозволяють розрахувати перепад тиску та розподіл коефіцієнта теплопередачі уздовж довжини труби.

У процесі теплообміну в екранних трубах барабанного котла відбувається інтенсивне утворення парових бульбашок. Їх зародження зумовлене локальним перегрівом рідини на стінках труб, після чого бульбашки, завдяки меншій густині, відриваються й підіймаються разом із потоком води. При цьому формується пароводяна суміш із широким діапазоном розмірів бульбашок. Частина дрібних бульбашок транспортується потоком угору безпосередньо в барабан, тоді як більші бульбашки схильні до коалесценції та швидшого відокремлення від рідини.

У барабані відбувається складний процес сепарації пари від води. Завдяки гравітаційному осіданню важча рідина повертається до нижньої частини барабана і далі спрямовується у циркуляційний контур, тоді як легша фракція у вигляді насиченої пари прямує до верхньої частини [5-6]. Додатково процес підсилюється завихрювачами та сепараційними елементами, що збільшують

ефективність відділення вологи. Наприклад, вертикальні циклони, що розміщені всередині барабана рядами вздовж його довжини (рис. 1). Рис. 1 свідчить, що пароводяна суміш подається тангенціально, перенаправлення пароводяної суміші здійснюється перегородками. У цьому внутрішньому розташуванні барабана очищена вода залишає вертикальні циклони вниз до низхідних труб. Пара тече вгору від циклонів до першого, а потім до другого скрубера та виводиться через вихідне сопло парового барабана.

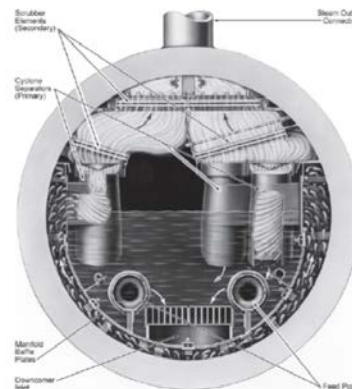


Рис. 1. Внутрішньо-корпусні пристрої парового барабана з трьома рядами циклонних сепараторів [5]

Проте створити комп'ютерну модель зображеного на рис. 1 процесу дуже складно, тому слід вдатись до аргументованого спрощення розрахункової області.

Також важливо зазначити, що швидкість потоку, розподіл температури та інтенсивність кипіння суттєво впливають на ефективність сепарації. За надмірного пароутворення можливе винесення краплин рідини разом із паром, що знижує якість пари й може призвести до гідродударів у паропроводах. Тому дослідження закономірностей руху парових бульбашок і процесів їх відокремлення в барабані є ключовим для підвищення надійності та ефективності роботи котлоагрегату. Таким чином, в даній роботі зроблена спроба моделювання контуру природної циркуляції в котлі типу ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) за допомогою студентської версії ANSYS-Fluent. В доступній літературі рішення такого роду задач не спостерігається.

Метою статті є визначення об'ємного паровмісту і швидкості пароводяної суміші на виході з труб, що екранують паливню котла ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ) та висоти розташування дзеркала випаровування в його барабан-сепараторі оскільки від цього залежить сольовий баланс в котлоагрегаті.

Метод дослідження – комп’ютерне моделювання теплових потоків спрямованих від факелу розжарених газів в паливні котельного агрегату котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) до води, що рухається і поступово випаровується в екранних трубах згаданого котельного агрегату, яка потім потрапляє у вигляді струменів пароводяної суміші в об’єм барабан-сепаратора, де відбувається відокремлення рідкої фази від газоподібної. Комп’ютерне моделювання виконувалося в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, що є абсолютно безкоштовним (з 2015 року) і призначеним для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об’єкт дослідження – це процеси теплообміну і гідродинаміки, що мають місце при вільно-конвективному русі рідини в трубах, що екранують стінки паливних котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) під час її випаровування і процеси сепарації пари від води внаслідок різниці густин всередині об’єму барабан-сепаратора котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Предмет дослідження – є термодинамічні параметри пароводяної суміші як на виході з кип’ятильних труб так і в середині барабан-сепаратора котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Розроблена модель в свою чергу дозволить отримати візуалізацію траєкторій крапель води в залежності від їх діаметру, що визначають деякі особливості течії пари в паровому об’ємі барабан-сепаратора, яку неможливо отримати наявними способами експериментального дослідження на працюючому обладнанні.

Виклад основного матеріалу. В якості розрахункової області вибрано три поряд розташовані труби, що екранують паливну котла ГМ-50 (рис. 2а) та фрагмент барабан сепаратора (рис. 2б), в який подають пароводяну суміш ці труби. Таку розрахункову область вибрано з врахування обмежень які діють для студентської версії ANSYS-CFX.

Чисельне моделювання теплогідродинамічних процесів у топковому просторі котла виконувалося з використанням програмного комплексу ANSYS CFX. Основну увагу було приділено відтворенню структури потоку, особливостей змішування газоповітряних струменів, формування температурного поля та зон утворення оксидів азоту.

Для апроксимації розрахункової області застосовано гібридну сітку, яка поєднує структуровані та неструктуровані елементи.

Структурована сітка використовувалася для моделювання течії у приміжовому шарі, що формується на межі «тверда поверхня – робоче середо-

вище». Для коректного опису градієнтів швидкості та температури у цій зоні було сформовано не менше 20 шарів скінченних елементів, причому кожен наступний шар збільшувався на 10% відносно попереднього.

Між приміжовими шарами область заповнювалася неструктурованою сіткою, густина якої регулювалася параметром Relevance Fine. Середній розмір елемента становив близько 1 мм. Для забезпечення плавного переходу між структурованою та неструктурованою зонами застосовувався метод MultiZone, що дозволяє узгодити різні топології сітки та зберегти високу якість розрахункової області.

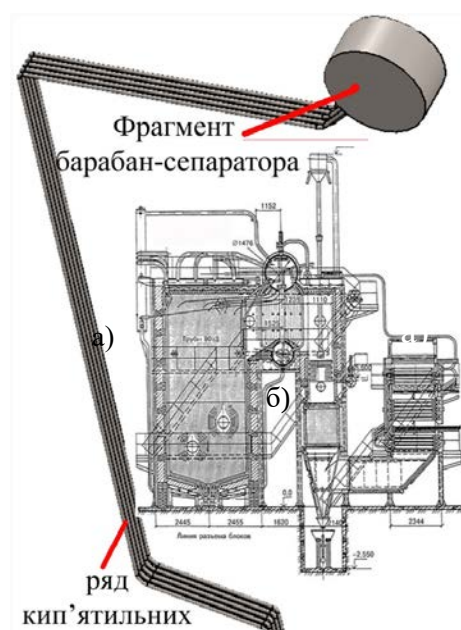


Рис. 2. Поздовжній переріз котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) (а) та розрахункова область задачі (б)

В якості керуючих рівнянь використовується система рівнянь Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями. Математичний апарат та повний опис згаданих рівнянь подані у спеціалізованій довідковій літературі [7-9] і є загальновідомими, тому в даній роботі вони не наводяться, оскільки автори статті не є їх розробниками. Турбулентний рух газоповітряної суміші описувався за допомогою моделі k-ε Realizable, яка добре зарекомендувала себе для задач з інтенсивним змішуванням та згорянням.

Процеси горіння природного газу моделювалися за допомогою моделі змішування та згоряння (Non-Premixed Combustion) із застосуванням бібліотек хімічних реакцій та врахуванням впливу температури на кінетику утворення оксидів азоту.

Формування NO_x враховувалося за термічним механізмом Зельдовича.

Моделювання руху крапель води виконувалося у вигляді дискретної фази сферичних частинок, розсіяних у безперервному середовищі (паровому потоці), з використанням підходу DPM (Discrete Phase Model). ANSYS CFX дозволяє відслідковувати траєкторії руху частинок та процеси тепломасообміну з навколишнім середовищем.

В якості гідродинамічних граничних умов на перерізах труб поблизу нижнього роздаткового колектору задавалась швидкості в контурі циркуляції. Для визначення цих швидкостей, використано методику Нормативного методу [10] і визначено залежність опору опускної частини контуру і корисного напору в підйомній ланці від витрати води на вході в опускні труби. Далі, графічним способом (рис. 3) на перетині функціональних кривих визначено дійсна витрата пароводяної суміші в екранних трубах, а через неї і її швидкість, що в якості граничних умов на вході потоку в нижній роздатковий колектор задавалась у CFD-моделі. Таким чином, дійсна швидкість циркуляції в контурі становить 0,485 м/с.

Для пальників задавалась витрата природного газу, температура та швидкість виходу з сопел. Повітря подавалося з коефіцієнтами надлишку, необхідними для забезпечення стехіометричних умов горіння.

На виході з паливни застосовувалася умова Pressure Outlet, що забезпечувала вільний вихід продуктів згоряння при фіксованому надлишковому тиску. Стіни моделювалися як *adiabatic walls*, без урахування теплопередачі через огорожувальні конструкції.

Теплові граничні умови на стінках труб вибирались згідно роботи [11].

Барабан-сепаратор котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) розташований окремо від паливни, тому на зовнішні поверхнях нього задавались умови ізоляції. При розробці моделі барабан-сепаратора, бралось до уваги, що пара сепарується від рідини внаслідок різниці густин всередині об'єму барабану і під дією підйомної архімедової сили рухається до верхньої частини барабану де полишає барабан через три отвори для відведення сухої насиченої пари до пароперегрівача (позначено «витік пари» на рис. 4). У нижній частині барабана знаходяться три отвори для опускних труб, по яким з барабана рухається вода в нижні роздаткові колектори (рис. 4).

Слід зазначити, що надійних експериментальних даних по паровмісту, швидкості і температурі пароводяної суміші на виході з труб, що екранують паливню в доступній літературі немає. Тому для верифікації моделі використаний аналітичний метод на основі Норм теплового розрахунку [10].

Обговорення отриманих результатів. Основними результатами при розрахунках за допомогою CFD-моделі є середній об'ємний паровміст (Vapour. Volume fraction) і середня швидкість пароводяної суміші (Vapour. Velocity) як в середині труб так і в об'ємі барабану.

Середній об'ємний паровміст на кожній ділянці обчислювався за формулою:

$$\beta = \left(1 + \frac{1-\bar{x}}{\bar{x}} \frac{\rho''}{\rho'}\right)^{-1}, \quad (1)$$

де ρ'' і ρ' – густина води і пари відповідно, що визначаються в залежності від тиску в барабані; $\bar{x}$ – середній масовий паровміст:

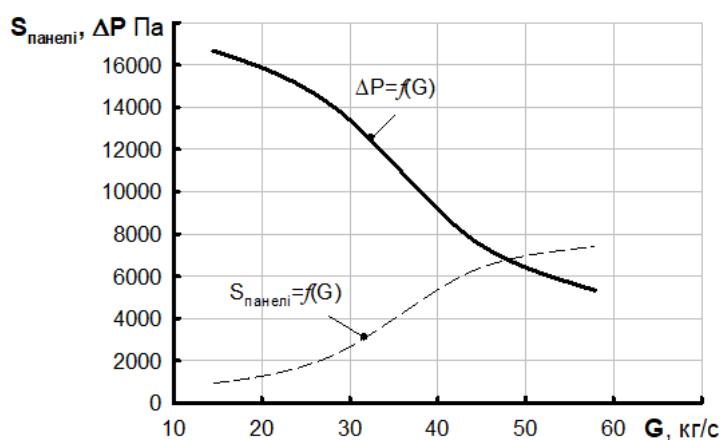


Рис. 3. Залежність опору опускної частини контуру ΔP і корисного напору $S_{\text{панелі}}$ підйомної ланки труби від швидкості води на вході в опускні труби

$$\bar{x} = \frac{Q}{rG}, \quad (2)$$

де r – питома теплота пароутворення, Q – теплове навантаження на ділянці труб, що залежить від середнього питомого теплове навантаження радіаційних поверхонь паливни, яке в свою чергу визначено за допомогою Нормативного методу [10] і G – витрата води в панелі труб, що екранують паливню. Визначається за допомогою значення дійсної швидкості циркуляції в контурі (рис. 3).

Розподіл об'ємного паровмісту пароводяної суміші вздовж труб представлено на рис. 4а, б. Для верифікації результатів моделювання використовувався аналітичний розрахунок, що виконувався за допомогою Нормативного методу [10]. Це реалізовано в роботі процедура верифікації моделі. Цифрами на рис. 4 позначено номери окремих ділянок труб, на яких аналітично обчислено середній об'ємний паровміст. Числові значення середнього об'ємного паровмісту приведені на рис. 4а у рамках поблизу позначення номеру ділянки чорним кольором. Червоним кольором приведені осереднені по об'єму кожної ділянки значення Vapour. Volume fraction які відповіда-

ють об'ємному паровмісту з CFD-моделі. Як свідчить рис. 4а, значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємного паровмісту, що визначений аналітично за [10] знаходяться в межах від 9 до 18%.

Аналіз рис. 4а також свідчить, що розподіл парових пазирів по висоті кип'ятильних труб не є постійним – як свідчить робота [11] в області активного горіння створюються умови погіршеного теплообміну, відбувається інтенсивне випаровування води і заповнення труб паром. В області розташування циркуляційних зон димових газів з меншою температурою (в верхніх кутах паливни) створюються умови поверхневої конденсації води і ступінь сухості пари зменшується. Також, з рис. 4а видно, що об'ємний паровміст в трубах на виході з труби становить 0,861. Пароводяна суміш з такими параметрами поступає в барабан-сепаратор і формує дзеркало випаровування.

Розподіл об'ємної долі пари в пароводяній суміші, що поступає в об'єм барабану в збільшеному вигляді представлено на рис. 4б. Як свідчить рис. 7 барабан наповнюється рідиною до свого «екватора» но рівень води в ньому постійно коли-

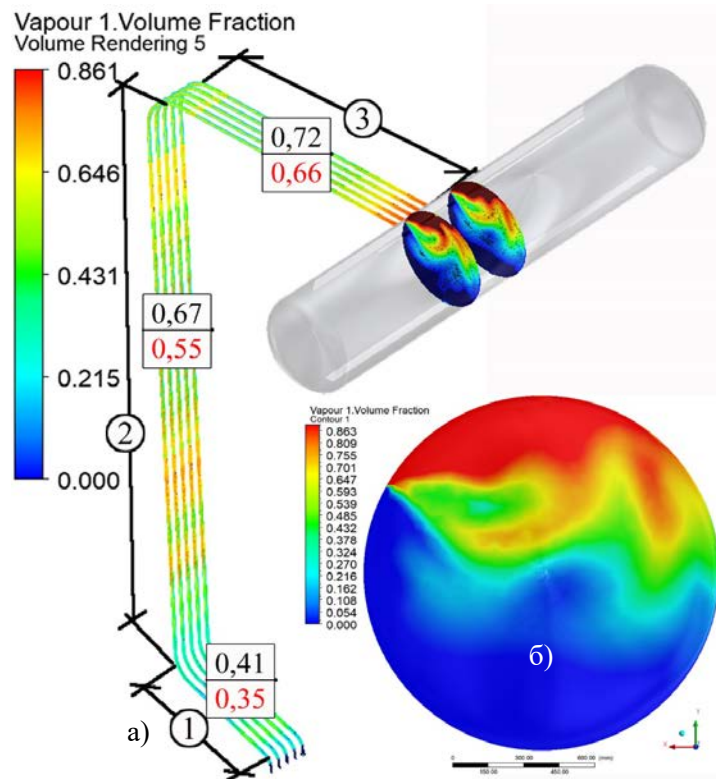


Рис. 4. Середній об'ємний паровміст у контурі природної циркуляції котла ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ) (а), збільшений переріз барабану для візуалізації розподілу пари в об'ємі барабан-сепаратора (б)

вається. Аналіз даних рис. 4б також свідчить, що нижче екватору барабана знаходиться рідина, яка по опускним трубам має направлятися в нижній роздатковий колектор котельного агрегату. А пара, внаслідок суттєвої різниці в густині накопичується поблизу верхніх патрубків, звідки прямує в пароперегрівач. На рис. 4б, з метою верифікації отриманих результатів, приведена схема потоку в паровому барабані з природним розділенням пари/води з роботи [5]. Як свідчить рис. 5, в представлений роботі вода накопичується ≈ 150 мм нижче «екватора» барабан сепаратора як і в верифікований роботі [6].

Поверхня дзеркала випаровування має складну хвилясту поверхню яка знаходиться в постійному русі.

Висновки. Проведені розрахунки дозволяють зробити наступні висновки:

– визначена дійсна витрата робочого тіла в екранних трубах і швидкість, що в якості граничних умов використана в наступних роботах по

моделюванню процесів сепарації пари в барабан-сепараторі котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) та при моделюванні його термонапруженого стану;

– результати верифікації свідчить, що значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємному паровмісту, що визначений за аналітичною методикою знаходяться в межах від 9 до 18%. Такий результат викликаний як припущеннями аналітичної методики так і обмеженнями студентської версії ANSYS;

– оскільки, пароводяна суміш подається на дзеркало випаровування як в даній задачі, то струмені двофазної суміші, яка направляється з кип'ятильних труб створюють умови значного хвилювання поверхні. З метою запобігання утворення хвиль на поверхні дзеркала випаровування рекомендується двофазну пароводяну суміш подавати під спеціальні конструктивні елементи барабан-сепаратора, дірчасті листи. Створення такої моделі планується в наступних роботах.

Список літератури:

1. Wen Tan, Horacio J. Marquez, Tongwen Chen, Jizhen Liu. Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit. *Journal of process control*. 2005. Vol. 15. P. 883–891 DOI:10.1016/j.jprocont.2005.03.007.
2. Zhang M.H., Chu K.W., Wei F., Yu A.B. A CFD–DEM study of the cluster behavior in riser and downer reactors. *Powder Technology*. 2008. Vol. 184. Issue 2. P. 151–165 DOI:10.1016/j.powtec.2007.11.036.
3. Emara–Shabaik H.E., Habib M.A., Al-Zaharna I. Prediction of risers tubes temperature in water tube boiler. *Applied mathematical modeling*. 2008. Vol. 33. Issue 3. P. 1323–1336 DOI:10.1016/j.apm.2008.01.015.
4. Paweł Ocioń, Marzena Nowak, Stanisław Łopata. Simplified Numerical Study of Evaporation Processes Inside Vertical Tubes. *Journal of Thermal Science*. 2014. Vol.23, No.2, P. 177–186 DOI: 10.1007/s11630-014-0693-7.
5. Mario Nowitzki. Development and validation of a gas-liquid two-phase model for industrial computational fluid dynamics applications. Thesis for: Doctoral / Technical University of Applied Sciences Wildau. Deutschland. 2020. 228 p. DOI: 10.26127/BTUOpen-5413.
6. Kitto John B., Stultz eds. Steam: Its generation and use. 41. ed., 1. print. Barberton, Ohio: Babcock & Wilcox. 2005. ISBN: 0963457012.
7. Ansys Fluent 14.5 Theory Guide. New-York, USA: ANSYS Inc, 2012.
8. Versteeg Henk K., Weeraratne Malalasekera. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. 2. ed., [Nachdr.] 2007. Harlow: Pearson/Prentice Hall. ISBN: 9780131274983
9. CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу: монографія / О.В. Баранюк, М.В. Воробйов, А.Ю. Рачинський. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. 164 стр.
10. Тепловий розрахунок котельних агрегатів. Нормативний метод. Москва / за ред. Кузнєцова Н.В. Москва. Енергія, 1973. 296 с.
11. Черноусенко О.Ю., Рачинський А.Ю., Баранюк О.В. CFD моделювання паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. Том 79 №2. С. 138–149. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.10>

Baranyuk O.V. MODELING OF FLOW AND PHASE TRANSITION IN THE NATURAL CIRCULATION CIRCUIT OF THE GM-50-1 BOILER (N-50-3.9-440GM)

The article considers the problem of extending the service life of steam boilers of thermal power plants, which form the basis of the industrial energy complex of Ukraine. The object of the study is the GM-50-1 boiler unit (E-50-3.9-440GM), in particular its drum-separator, which is the most technologically complex and costly structural element. The results of CFD modeling of the processes of steam generation in boiler tubes and water vapor separation in the drum space, performed in the free student version of ANSYS Student, are presented. The purpose of the study is to determine the volumetric steam content and the velocity of the steam-water

mixture at the outlet of the screen tubes, as well as the height of the evaporation mirror in the drum, on which the salt balance of the boiler unit depends. The Normative method for calculating the average volumetric steam content in natural circulation circuits was used to verify the CFD model. The deviation between the results of CFD and analytical calculations is 9–18%, which is explained both by the simplifications of the analytical method and the limitations of the student version of the software package. CFD modeling also made it possible to visually determine the phase transition zones and the position of the evaporation mirror, which is critically important for ensuring reliable operation of the drum-separator. The verification results show that the deviation values of the CFD model calculation results from the values of the average volumetric vapor content determined by the analytical method are in the range from 9 to 18%. This result is caused by both the assumptions of the analytical method and the limitations of the student version of ANSYS. It was determined that the supply of a water-vapor mixture to the evaporation mirror as in this problem leads to significant surface turbulence. In order to prevent the formation of waves on the surface of the evaporation mirror, it is recommended to supply the two-phase water-vapor mixture under special structural elements of the drum-separator, perforated sheets.

Key words: *evaporation, natural circulation, convective boiling, fuel station, boiler.*

Дата надходження статті: 20.09.2025

Дата прийняття статті: 11.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Босак А.В.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Кондратенко Д.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тесленко О.І.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ГІБРИДНОГО АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЛАНЦЮГОВОГО КОНВЕЄРА

У статті розглянуто актуальну науково-практичну задачу підвищення енергоефективності промислових конвеєрних установок, що експлуатуються в умовах переривчастих технологічних циклів. Проблема полягає в тому, що значна частина електроенергії марно витрачається під час роботи обладнання в режимі холостого ходу, коли транспортування вантажу не відбувається. Ситуація ускладнюється поширеною практикою вибору приводних асинхронних двигунів зі значним запасом потужності, що призводить до їх експлуатації з низьким коефіцієнтом завантаження. Це, в свою чергу, веде до роботи двигуна в зоні зниженого коефіцієнта корисної дії та низького коефіцієнта потужності ($\cos \phi$), що створює додаткові технічні та економічні втрати.

Метою даної роботи є комплексний аналіз існуючих та розробка нових, більш досконалих методів керування для мінімізації енергоспоживання конвеєра в реальних умовах експлуатації. Для досягнення поставленої мети розроблено математичну модель енергоспоживання, що дозволяє розраховувати миттєву та інтегральну потужність як функцію від параметрів вантажопотоку. Проведено порівняльний техніко-економічний аналіз трьох базових стратегій модернізації: заміни стандартного двигуна на енергоефективний аналог класу IE3, впровадження частотно-регульованого приводу (ЧРП) для керування швидкістю, та реалізації системи автоматичного вимкнення («Старт-Стоп»).

За результатами моделювання встановлено, що для типового циклу роботи з тривалими паузами найбільш ефективною є система «Старт-Стоп» з терміном окупності менше одного року. Однак, її недоліком є значна кількість пусків двигуна при коротких перервах у вантажопотоці. Наукова новизна роботи полягає у розробці гібридного адаптивного алгоритму керування, який інтегрує переваги ЧРП та системи «Старт-Стоп». Запропонований алгоритм при зникненні вантажу миттєво знижує швидкість конвеєра, забезпечуючи негайну економію, та лише після заданої часової затримки, переконавшись у довготривалості простою, виконує повну зупинку приводу. Такий підхід дозволяє досягти максимального енергозбереження, одночасно зменшуючи кількість пускових циклів та механічні навантаження на обладнання. Крім того, проведено аналіз чутливості, який встановив кількісну залежність економічної ефективності кожного методу від частки холостого ходу в операційному циклі та визначив точку біфуркації, після якої доцільність застосування системи «Старт-Стоп» перевищує ЧРП.

Ключові слова: енергоефективність, ланцюговий конвеєр, асинхронний привід, ЧРП, коефіцієнт завантаження, гібридний алгоритм, аналіз чутливості.

Постановка проблеми. Підвищення енергоефективності промислових підприємств є однією з ключових умов забезпечення їх конкурентоспроможності, зниження собівартості продукції та відповідності сучасним екологічним стандартам

[1, 2] Значну частку в загальному енергоспоживанні багатьох галузей, зокрема агропромислового комплексу, гірничої промисловості та логістики, займає конвеєрний транспорт. Незважаючи на конструктивну простоту, реальні режими ек-

платуації цих установок часто призводять до значних нераціональних витрат електроенергії, що створює важливу науково-технічну проблему.

Основна причина низької енергоефективності полягає в невідповідності між встановленою потужністю приводного обладнання та реальним характером його завантаження. По-перше, поширена інженерна практика передбачає вибір асинхронних двигунів зі значним запасом потужності (в 2-3 рази) для гарантованого подолання пускових моментів та можливих пікових навантажень [3]. По-друге, більшість технологічних процесів мають переривчастий характер, через що конвеєри значну частину робочого часу (до 50-70%) функціонують в режимі холостого ходу – тобто, рухаються без корисного вантажу, очікуючи на нову порцію сировини [4].

Поєднання цих двох факторів призводить до комплексу негативних наслідків. Робота двигуна зі значним недовантаженням (коефіцієнт завантаження 25-40%) переводить його в зону з низьким коефіцієнтом корисної дії та, що не менш важливо, критично низьким коефіцієнтом потужності ($\cos \phi$) [5]. Це веде не лише до прямих втрат активної енергії, а й до генерації надлишкової реактивної потужності в мережу, що збільшує навантаження на трансформатори, кабельні лінії та призводить до штрафних санкцій з боку енергопостачальних компаній. Традиційні системи керування, що базуються на прямому пуску від мережі через магнітний пускач, не здатні адаптуватися до цих змінних режимів, продовжуючи споживати значну потужність навіть за відсутності корисного навантаження.

Таким чином, виникає науково-технічна суперечність: з одного боку, для забезпечення надійності вимагається встановлення приводів із запасом потужності, а з іншого – саме цей запас при переривчастій роботі стає причиною значних енергетичних втрат. Існуючі підходи до модернізації часто є фрагментарними, вирішуючи лише частину проблеми (наприклад, заміна двигуна без зміни системи керування). Відсутній комплексний підхід до розробки системи керування, яка б адаптувалася до реального вантажопотоку в режимі реального часу, мінімізуючи енергоспоживання у всіх фазах операційного циклу.

Метою статті є розробка системи керування, яка адаптується до реального вантажопотоку в режимі реального часу, мінімізуючи енергоспоживання у всіх фазах операційного циклу. Завданням дослідження є не лише кількісна оцінка ефективності відомих методів (встановлення ЧРП,

системи «Старт-Стоп»), а й синтез нового, гібридного адаптивного алгоритму, а також визначення техніко-економічних меж (областей доцільності) застосування кожного з рішень залежно від специфіки технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема енергоефективності електромеханічних систем є комплексним, міждисциплінарним завданням синергетичного характеру, що знаходиться на стику теорії електричних машин, автоматичного керування та енергетичного менеджменту. Теоретичні аспекти електромагнітних та електромеханічних процесів в асинхронних двигунах, що є основою будь-якого дослідження їх режимів роботи, були фундаментально досліджені різними вітчизняними науковцями, серед яких Л. І. Мазуренко, Ю. М. Васьковський, О. М. Сінчук. Їхні праці заклали основи для аналізу робочих характеристик та енергетичних показників асинхронних машин, які використовуються і сьогодні.

Питання зниження енергетичних втрат безпосередньо в промислових електроприводах активно розглядаються в роботах О. П. Чорного, А. В. Садового та інших, де аналізуються структури втрат, переваги впровадження двигунів вищих класів енергоефективності (IE2, IE3, IE4) та методики проведення енергетичних аудитів. У цих дослідженнях доведено, що найбільший потенціал енергозбереження полягає не стільки у заміні самого двигуна, скільки в оптимізації системи керування ним.

Ключовою технологією для такої оптимізації є застосування частотно-регульованих приводів (ЧРП). Розвитку теорії та практики частотного керування присвячені роботи С. М. Переседи, С. М. Ковбаси. В їхніх працях детально розглянуто як прості методи скалярного керування ($U/f=\text{const}$), так і більш досконалі алгоритми векторного керування, що дозволяють підтримувати високі енергетичні показники двигуна в широкому діапазоні швидкостей та навантажень. Багато публікацій демонструють значний економічний ефект від впровадження ЧРП у насосних, вентиляторних та компресорних установках, де економія досягається за рахунок регулювання продуктивності відповідно до поточних потреб.

Однак, аналіз публікацій показує, що більшість досліджень сфокусовані на оптимізації роботи обладнання в безперервних або квазістаціонарних режимах. Проблема керування приводами, що працюють у вираженому переривчастому циклі, як-от конвеєрний транспорт на багатьох

виробництвах, залишається менш дослідженою. Застосування ЧРП у таких системах часто обмежується лише реалізацією плавного пуску або зниженням швидкості в режимі холостого ходу. Прості системи автоматизації типу "Старт-Стоп" хоч і є ефективними при довгих простоях, але не розглядаються з точки зору їх впливу на ресурс обладнання через часті пускові цикли.

Таким чином, незважаючи на велику кількість робіт у галузі енергоефективного керування, залишається відкритою задача синтезу адаптивної системи керування, яка б поєднувала переваги плавного регулювання швидкості та повної зупинки приводу, обираючи оптимальну стратегію в режимі реального часу залежно від тривалості пауз у вантажопотоці. Саме на розв'язання цієї задачі і спрямоване дане дослідження.

Виклад основного матеріалу. В якості об'єкта дослідження обрано ланцюговий скребковий конвеєр ТСЦ-100, що є типовим обладнанням для горизонтального транспортування сипучих вантажів (комбікорму, зерна) на заводах з виробництва кормів.

Вихідні дані та константи:

- Продуктивність, $Q = 50 \text{ т/год} = 13,89 \text{ кг/с}$.
- Довжина конвеєра, $L = 40 \text{ м}$.
- Швидкість ланцюга, $v = 0,8 \text{ м/с}$.
- Маса 1 м.п. тягового органу (ланцюг + скребки), $q_{\text{ланц}} = 25 \text{ кг/м}$.
- Коефіцієнт тертя ланцюга по напрямних, $\mu_{\text{ланц}} = 0,2$.
- Коефіцієнт тертя вантажу по коробу, $\mu_{\text{вант}} = 0,4$.
- Прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.
- ККД редуктора, $\eta_{\text{ред}} = 0,95$.
- ККД частотного перетворювача (ЧРП), $\eta_{\text{чрп}} = 0,97$.

Циклограма роботи (60 хвилин):

- Час роботи під навантаженням, $t_{\text{ном}} = 35 \text{ хв} = 0,5833 \text{ год}$.
- Час роботи вхолосту, $t_{\text{хх}} = 15 \text{ хв} = 0,25 \text{ год}$.
- Час простою, $t_{\text{простій}} = 10 \text{ хв} = 0,1667 \text{ год}$.

Необхідна механічна потужність на валу редуктора $P_{\text{мех}}$ (кВт) визначається як сума потужності холостого ходу $P_{\text{мех хх}}$ та потужності на переміщення вантажу $P_{\text{мех вантаж}}$:

$$P_{\text{мех}}(t) = P_{\text{мех хх}} + P_{\text{мех вантаж}} \cdot L(t), \quad (1)$$

де $L(t)$ – коефіцієнт завантаження конвеєра (0 або 1).

Споживана з мережі активна потужність $P_{\text{спож}}$ (кВт) розраховується з урахуванням ККД приводу:

$$P_{\text{спож}}(t) = P_{\text{мех}}(t) / (\eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{дв}}). \quad (2)$$

Розрахунки показали, що необхідна механічна потужність під номінальним навантаженням складає 5.32 кВт. При встановленій номінальній потужності двигуна 15 кВт, коефіцієнт завантаження K_z становить:

$$K_z = P_{\text{мех ном}} / P_{\text{дв ном}} = 5.32 / 15.0 \approx 0.355 \text{ або } 35\%. \quad (3)$$

Робота асинхронного двигуна при такому низькому завантаженні є вкрай неефективною. Це підтверджує, що фокусуватися слід не на номінальному ККД, а на оптимізації роботи в реальних, частково навантажених режимах.

Для порівняльного аналізу було змодельовано чотири сценарії роботи конвеєра. Базовий сценарій імітує існуючий стан, де конвеєр з двигуном класу IE1 працює безперервно протягом усього робочого періоду, включаючи час простою, що призводить до значних нераціональних витрат енергії. Сценарій 1 ("Заміна на IE3") передбачає просту заміну двигуна на аналог вищого класу енергоефективності без зміни системи керування, що забезпечує невелику економію за рахунок вищого ККД. Сценарій 2 ("Встановлення ЧРП") моделює роботу з частотно-регульованим приводом, який знижує швидкість конвеєра до мінімальної в режимі холостого ходу, суттєво зменшуючи потужність. Сценарій 3 ("Система Старт-Стоп") реалізує найбільш радикальний підхід, повністю вимикаючи привід після короткої затримки при відсутності вантажу, що забезпечує максимальну економію енергії в періоди простою.

Результати аналізу сценаріїв роботи конвеєрної представлені в табл. 1.

Проведений аналіз енергоспоживання ланцюгового конвеєра ТСЦ-100 показав, що ключовим джерелом енергетичних втрат для даної установки є не стільки номінальний ККД обладнання, скільки нераціональний режим його експлуатації. Встановлено, що значна частка електроенергії, а саме близько 20% від загального споживання, витрачається неефективно під час роботи конвеєра в режимі холостого ходу в очікуванні нової партії сировини. Таким чином, найбільш ефективними є ті заходи, що спрямовані безпосередньо на оптимізацію самого режиму роботи, а не лише на незначне підвищення ККД приводу.

Спроба вирішити проблему шляхом простої заміни існуючого двигуна на сучасний аналог класу IE3 є економічно недоцільною, оскільки не впливає на основну причину втрат і має надзвичайно довгий термін окупності (понад 11 років). Натомість, заходи, що модернізують систему керування, демонструють високу ефективність.

Результати аналізу сценаріїв роботи конвеєрної установки

Показник	Базовий варіант (двигун ІЕ1)	Сценарій 1. Заміна двигуна на ІЕ3	Сценарій 2. Встановлення ЧРП	Сценарій 3. Система "Старт-Стоп"
Основний принцип економії	-	Підвищення ККД двигуна	Зниження швидкості при роботі вхолосту	Повне виключення роботи вхолосту
Споживана потужність (Навантаження)	6,28 кВт	6,08 кВт	6,28 кВт	6,28 кВт
Споживана потужність (Холостий хід)	3,71 кВт	3,59 кВт	1,15 кВт	0 кВт
Річне споживання енергії, кВт·год	18 360	17 800	15 800	14 640
Річна економія енергії, кВт·год	0	560	2 560	3 720
Річна економія коштів, грн (при тарифі 5,5 грн/кВт·год)	0	3 080	14 080	20 460
Орієнтовні капіталовкладення, грн	-	35 000	55 000	20 000
Простий термін окупності, років	-	~11,4 років	~3,9 років	~0,98 років (11,7 міс.)

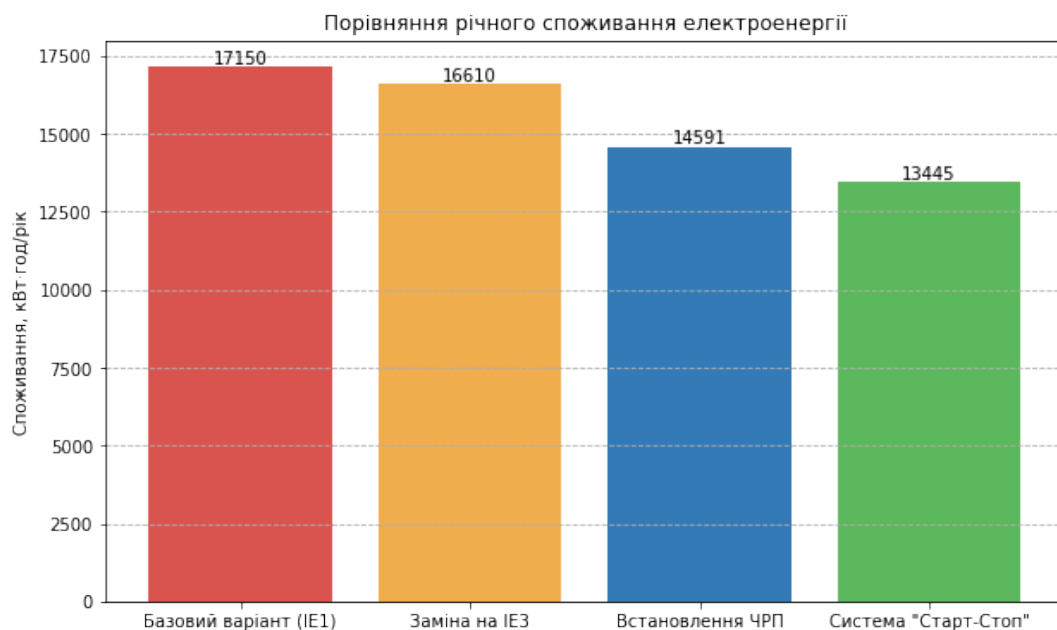


Рис. 1. Порівняння річного споживання електроенергії при запропонованих сценаріях роботи конвеєрної установки

Встановлення частотно-регульованого приводу забезпечує суттєву економію та додаткові технічні переваги, окуповуючись за прийнятний термін близько 4 років.

Враховуючи отримані результати, першочерговою та найбільш економічно обґрунтованою рекомендацією є впровадження автоматизованої системи «Старт-Стоп».

З метою усунення недоліків, притаманних розглянутим окремо методам, в рамках даного

дослідження було розроблено та запропоновано гібридний адаптивний алгоритм керування. Цей алгоритм покликаний вирішити ключову суперечність: неефективність ЧРП при тривалих простоях та значну кількість пускових циклів системи «Старт-Стоп» при коротких, частих паузах у вантажопотоці. Його логіка реалізується на базі ЧРП і полягає у двофазній реакції на зникнення продукту: спочатку система негайно знижує швидкість конвеєра до мінімального рівня,

Порівняльний техніко-економічний аналіз

Показник	Заміна на ІЕЗ	Встановл. ЧРП	Старт-Стоп	Гібридний
Річне споживання, кВт·год	17776	15794	14772	14725
Річна економія, грн	3178	14076	19700	19959
Капіталовкладення, грн	35000	55000	20000	55000
Термін окупності, років	11.0	3.9	1.0	2.8

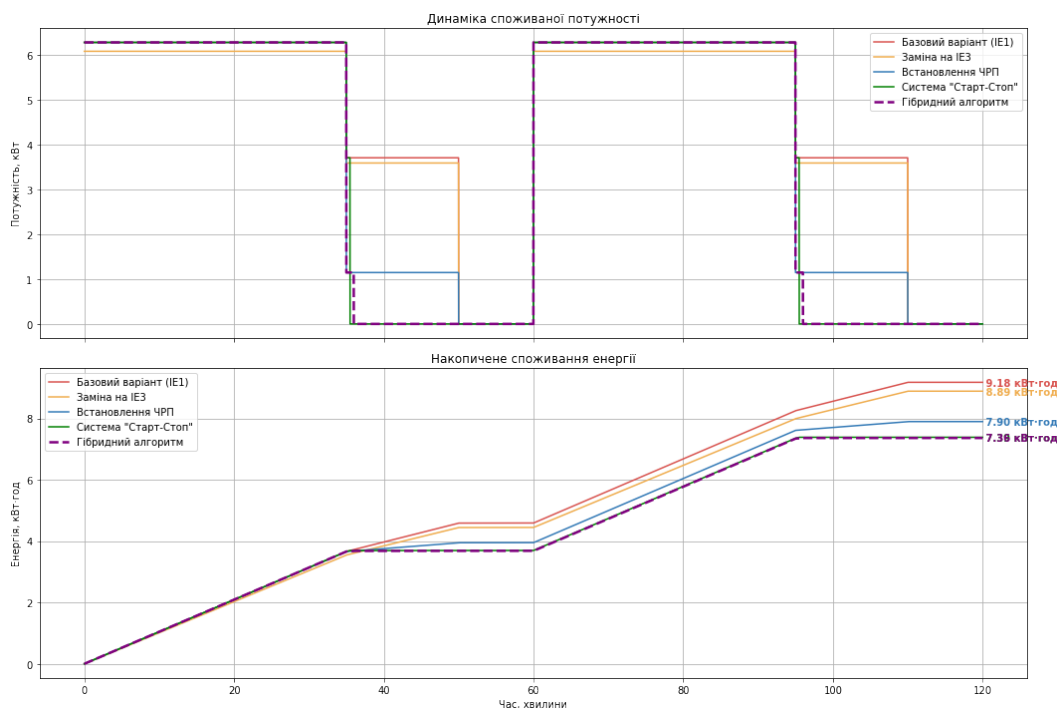


Рис. 2. Порівняльні графіки динамічної потужності та накопичення споживання енергії

забезпечуючи миттєву економію. Одночасно запускається таймер очікування. Якщо протягом заданої затримки (наприклад, 60 секунд) вантажопотік не відновлюється, система робить висновок про довготривалий простій і повністю вимикає привід, переводячи його в режим нульового споживання. Таким чином, гібридний підхід поєднує максимальну енергоефективність системи «Старт-Стоп» при довгих паузах з плавністю роботи та зменшенням кількості пусків, характерними для ЧРП, що робить його найбільш технологічно досконалим та універсальним рішенням для обладнання, що працює в умовах високої невизначеності вантажопотоку.

Порівняльний техніко-економічний аналіз всіх запропонованих методів представлений в табл. 2.

Результати динамічного моделювання, представлені на рис. 2, наочно демонструють ефективність запропонованих методів модернізації.

Верхній графік миттєвої потужності візуалізує поведінку гібридного алгоритму (пурпурна лінія),

який при зникненні вантажу спочатку знижує споживання до рівня ЧРП, а через хвилину простою – до нуля, як система «Старт-Стоп». Нижній графік накопиченої енергії підтверджує перевагу цього підходу: крива гібридного алгоритму йде практично впритул до кривої «Старт-Стоп», показуючи майже ідентичне, найнижче енергоспоживання (7.38 кВт·год за 2 години). Це доводить, що гібридний метод успішно поєднує максимальну економію при довгих простоях з технологічними перевагами плавного регулювання швидкості, що робить його найбільш універсальним та досконалим рішенням.

Висновки. У даному дослідженні було доведено, що ключовим напрямком підвищення енергоефективності конвеєрів, що працюють у переривчастому режимі, є оптимізація системи керування, а не проста заміна двигуна. На основі проведеного моделювання встановлено, що система «Старт-Стоп» є найбільш швидкоокупним рішенням, проте наукова новизна роботи полягає у розробці гібридного адаптивного алгоритму,

який поєднує переваги частотного регулювання (плавність роботи при коротких паузах) з максимальною економією повної зупинки при довгих простоях. Запропонований гібридний метод, хоч і має довший термін окупності, є найбільш тех-

нологічно досконалим та універсальним рішенням, що забезпечує високу енергоефективність та надійність в умовах змінного вантажопотоку, що і рекомендується для впровадження на підприємствах зі складною логістикою.

Список літератури:

1. Мелконова, І. В., Мелконов, Г. Л. Підвищення енергоефективності промислових підприємств. *Інноваційні технології для промисловості*. 2023. (1 (1)). <https://doi.org/10.33216/LTP-2022-1-1-1>
2. Антонів В. Моделювання механізму підвищення енергоефективності промислових підприємств. *Вісник Львівського університету. Серія економічна*. (66). С. 106–116. DOI: <http://dx.doi.org/10.30970/ves.2024.66.0.6609>
3. Василега П. О. Електропривод робочих машин: підручник / П. О. Василега. Суми : Сумський державний університет, 2022. 290 с. ISBN 978-966-657-900-6
4. Слободянюк В. К., Максимов І. І. Визначення оптимальних параметрів циклічно-потоккової технології в глибоких кар'єрах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2021. Том 32 (71) Ч. 2 № 2. С. 88–98. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/14>
5. Автоматизовані електромеханічні системи: конспект лекцій / укладачі: Черв'яков В. Д., Леонтьєв П. В., Соколов С. В. Суми : Сумський державний університет, 2022. 253 с.

Bosak A.V., Kondratenko D.A., Teslenko O.I. DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A HYBRID CONTROL ALGORITHM TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF A CHAIN CONVEYOR

The article considers the current scientific and practical problem of increasing the energy efficiency of industrial conveyor systems operated in conditions of intermittent technological cycles. The problem is that a significant part of the electricity is wasted during the operation of the equipment in idle mode, when the cargo is not transported. The situation is complicated by the widespread practice of choosing to drive asynchronous motors with a significant power reserve, which leads to their operation with a low load factor. This, in turn, leads to the operation of the motor in the zone of reduced efficiency and low power factors ($\cos \varphi$), which creates additional technical and economic losses.

The purpose of this work is a comprehensive analysis of existing and the development of new, more advanced control methods to minimize the energy consumption of the conveyor in real operating conditions. To achieve this goal, a mathematical model of energy consumption has been developed that allows calculating instantaneous and integral power as a function of the parameters of the cargo flow. A comparative technical and economic analysis of three basic modernization strategies was conducted: replacing a standard engine with an energy-efficient IE3 class analogue, introducing a variable frequency drive (VFD) for speed control, and implementing an automatic shutdown system ("Start-Stop").

According to the simulation results, it was found that for a typical work cycle with long pauses, the most effective is the "Start-Stop" system with a payback period of less than one year. However, its disadvantage is a significant number of engines start during short breaks in the cargo flow. The scientific novelty of the work lies in the development of a hybrid adaptive control algorithm that integrates the advantages of the VFD and the "Start-Stop" system. The proposed algorithm instantly reduces the conveyor speed when the cargo disappears, providing immediate savings, and only after a specified time delay, making sure of the long-term downtime, performs a complete stop of the drive. This approach allows us to achieve maximum energy savings, while reducing the number of starting cycles and mechanical loads on the equipment. In addition, a sensitivity analysis was conducted, which established the quantitative dependence of the economic efficiency of each method on the share of idling in the operating cycle and determined the bifurcation point, after which the feasibility of using the Start-Stop system exceeds the VFD.

Key words: energy efficiency, chain conveyor, asynchronous drive, VFD, load factor, hybrid algorithm, sensitivity analysis.

Дата надходження статті: 08.09.2025

Дата прийняття статті: 23.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 621.355.9
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/18>

Бошкова І.Л.

Одеський національний технологічний університет

Волгушева Н.В.

Одеський національний технологічний університет

Гречановський А.П.

Одеський національний технологічний університет

Борець С.О.

Одеський національний технологічний університет

Тортіка Д.М.

Одеський національний технологічний університет

ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СУШІННЯ ЦЕОЛІТІВ 13X У МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ

Доведено, що цеоліти на даний час мають широку сферу використання завдяки своїм властивостям, таким як доступний пустотний простір і велика площа поверхні пір, особливий інтерес представляють цеоліти для термохімічного накопичення теплоти завдяки можливості забезпечувати високу щільність енергії. Відомо, що для багатократного використання цеолітів необхідно здійснити енерго-ефективну та швидку регенерацію, яка базується на процесі десорбції. Наголошується, що регенерація цеолітів є найважливішою стадією, що визначає ефективність всього процесу, у якому бере участь адсорбція. Визначено, що для здійснення процесу регенерації цеолітів може застосовуватися мікрохвильове нагрівання, яке має безліч переваг у порівнянні з конвективним, наприклад, пряме і об'ємне нагрівання опромінюваного матеріалу, а також вибіркове нагрівання, однак регенерація цеолітів в мікрохвильовому полі вивчена недостатньо, особливо в частині енергетичного ефекту взаємодії мікрохвильового поля з досліджуваним матеріалом. Відомо, що брак знань за тепловим ефектом сушіння цеолітів в мікрохвильовому полі є проблемою, яка не дозволяє здійснити їх промислове впровадження в ряді специфічних областей, зокрема, в технологіях термохімічного накопичення теплоти. Наведена методика проведення експерименту та експериментальна установка для дослідження сушіння цеолітів 13 X, частинки яких були різної форми: циліндричної та сферичної, в мікрохвильовому полі. Аналізується зміна температури та вологовмісту за часом, а також результати розрахунку кількості теплоти випаровування води та нагрівання досліджуваного зразка, які визначають корисний тепловий потік. Представлені дані щодо ККД процесу перетворення мікрохвильової енергії в теплову, який визначається як співвідношення корисного теплового потоку і вихідної потужності магнетрону. Визначена важливість раціонального формування шару цеолітів для підвищення енергоефективності процесу дегідратації.

Ключові слова: енергоефективність, мікрохвильове нагрівання, сушіння, вологовміст, температура, теплота.

Постановка проблеми. Інтерес до підготовки цеолітів визначається широкою сферою застосування. Цеоліти застосовуються як ідеальні матеріали в каталізі, адсорбції та біомедицині завдяки своїм властивостям, таким як доступний пустотний простір і велика площа поверхні пір. [1]. Особливий інтерес представляють цеоліти для

термохімічного накопичення теплоти завдяки можливості забезпечувати високу щільність енергії. В його основі лежать процеси одного з двох типів: оборотні реакції та сорбція. Завдяки здатності сорбційних систем зберігати теплову енергію при температурі навколишнього середовища скільки завгодно без втрат тепла, термохімічне накопи-

чення тепла стало широко досліджуваною технологією для сезонного накопичення енергії при низькій температурі (наприклад, для застосування в будинках). Регенерація цеолітів є найважливішою стадією, що визначає ефективність всього процесу, у якому бере участь адсорбція. Проблема швидкої та ефективної десорбції важлива для ефективності адсорбційних реакторів [2]. Мікрохвильове нагрівання в процесі сушіння призводить до нагрівання тільки цеоліту, що містить адсорбовану воду, без нагрівання навколишнього повітря [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цеоліти є унікальним класом твердих речовин з різноманітними застосуваннями в промислових процесах і для контролю забруднення навколишнього середовища. [5, 6]. Термін «цеоліт» був запропонований шведським мінералогом Акселем Ф. Кронштедтом в 1756 після того, як він спостерігав утворення піни на поверхні зразка мінералу при нагріванні [7]. Мінерал на вигляд «кипів», тому він назвав його «цеолітом», від грецьких слів *zein* «кипити» і *lithos* «камінь». Дамур у 1840 році продемонстрував оборотну гідратацію та дегідратацію цих матеріалів. Цеоліти відносяться до мінералів тектосилікатного типу, деякі з них зустрічаються в природі. Їх чітко визначений розмір пір, можливість зміни складу, термічна стабільність і комерційна доступність сприяли їх широкому використанню в промисловості та побуті, де використовуються їх унікальні властивості.

Найбільш важлива інформація про властивості, методи синтезу та окремі сфери застосування цієї групи алюмосилікатів представлена в [6]. Автори [7] відзначають, що конформація адсорбенту для поліпшення динаміки процесу і масопереносу – ще одна тема досліджень, що заслуговує на ретельний розгляд. Цеоліти мають поверхнево-активні центри кислотно-основного або окислювально-відновного характеру. Це зумовлює їхню виняткову адсорбційну та каталітичну активність [8]. Характерною особливістю цеолітів є наявність мікропор діаметром від 0,3 до 1,0 нм та об'ємом мікропор від 0,10 до 0,35 см³/г. Зазначається, що популярність цеолітів неухильно зростає, а дослідження їх властивостей, методів синтезу та напрямів використання не втрачають своєї актуальності. Про це свідчить постійно зростаюча кількість відомих структур цеолітів, описаних у базі даних INZA (Міжнародна асоціація з природних цеолітів) [9].

Для використання у технологіях термохімічного накопичення теплоти застосовують цеоліти 13X та 4A. Цеоліт 13X має хімічний склад $\text{Na}_2(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_2(7/2) \cdot x\text{H}_2\text{O}$, із співвідношенням

кремнезему до глинозему (Si/Al) близько 2,6-3,0, тоді як цеоліт 4A, цеоліт типу A, має формулу $\text{Na}_2(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_2(2) \cdot x\text{H}_2\text{O}$, із співвідношенням Si/Al близько 2. Обидва є алюмосилікатами лужних металів, але їх різні співвідношення Si/Al приводять до різних кристалічних структур та розмірів пор. Синтетичні цеоліти 3A, 4A, 5A і 13X мають назву молекулярні сита – це пористі матеріали, які діють як хімічний фільтр, поділяючи молекули за розміром завдяки своїй мікропористій структурі з рівномірними отворами. Вони вибірково адсорбують (притягують і утримують) молекули, які менші від діаметра їх пір, пропускаючи більші. Молекулярні сита використовуються як осушувачі для видалення вологи та інших розчинників, а також у процесах поділу газів та рідин. Сита 5A і 13X загалом мають схожі характеристики, з деякими відмінностями в деталях, які можуть зумовити перевагу одного з них іншому у випадках застосування [10]. Відносний вміст компонентів залежить від температури та часу активації.

Цеоліти широко використовуються для осушення у промислових та лабораторних масштабах, що обумовлено їх здатністю оборотно адсорбувати воду. Природні та синтетичні цеоліти з низьким вмістом кремнію мають значну гідрофільність [11]. Цеоліти типу A (з комерційними назвами 3A, 4A та 5A) і X (13X) широко використовуються для осушення газових та рідких потоків, в основному в процесах адсорбції при змінній температурі (TSA), але у випадку 13X також у процесах адсорбції при змінному тиску (PSA) [12]. Сушіння є одним із найраніших застосувань, де цеоліти успішно використовувалися як адсорбенти [13].

В останні роки відзначається зростаючий інтерес до цеолітових теплоаккумуляторів [14]. Цеолітові теплоаккумулятори – це хімічні накопичувачі, які здатні досягти щільності енергії 150–200 кВт год м⁻³ та практично без втрат енергії протягом сезону [15, 16]. Результати дослідження теплоакмулюючого цеоліту та оцінка ключових параметрів, отриманих на основі експериментальних результатів з NaY, представлені в роботі [16].

Регенерація цеолітів є найважливішою стадією, що відповідає за ефективність багаторазового використання цеолітів та визначається якістю процесу. Для цього необхідно вирішити проблему швидкої та ефективної десорбції. Для здійснення процесу десорбції цеолітів може застосовуватися мікрохвильове нагрівання, яке має безліч переваг у порівнянні з конвективним, наприклад, пряме і об'ємне нагрівання опромінюваного матеріалу, а також вибіркоче нагрівання [17]. Через низьку

теплопровідність цеоліту ($\sim 0,1\text{--}0,2\text{ Вт/м К}$) виникають значні обмеження при нагріванні та охолодженні у кондуктивному та конвективному методі, що призводить до зниження ефективності та збільшення часу зарядки. У разі мікрохвильового нагріву на енергоефективність впливають ККД перетворення електричної енергії на мікрохвилю та ККД перетворення мікрохвиль на тепло. Якщо перший характерний для використовуваного магнетрона та є незмінним, то другий визначається умовами процесу. Природно, що чим вище ККД, тим краще економічні показники мікрохвильового нагріву. Відповідні енергетичні аспекти МХ-регенерації цеолітів розглядалися рядом дослідників [4, 17, 18]. Зазначається [19], що застосування мікрохвильового нагріву дозволяє вести процес набагато швидше, чистіше та з нижчою енергоємністю порівняно з традиційними методами. Результати [20] підтверджують, що мікрохвильове нагрівання не погіршує адсорбційні властивості цеолітів, оскільки наступні випробування виявили ідеальну відтворюваність результатів адсорбції та десорбції.

Аналіз наведених літературних даних показує, що застосування мікрохвильового нагріву для сушіння цеолітів характеризується важливими перевагами в порівнянні з конвективним та кондуктивним методом, проте не вистачає експериментальних даних за кінетикою сушіння та перерозпо-

ділом теплових потоків в процесі МХ обробки для цеолітів, які визнані як раціональні в технологіях термохімічного накопичення теплоти.

Метою статті є визначення ефективності мікрохвильового сушіння щільного шару цеолітів 13X з різною формою зерен на підставі порівняльного аналізу ККД перетворення енергії мікрохвильового електромагнітного поля у внутрішню енергію матеріалу. Для досягнення мети роботи проведені експериментальні дослідження кінетики сушіння шару цеолітів з циліндричною формою зерен $13X_c$ та зі сферичною формою $13X_s$, на підставі теплових розрахунків здійснено порівняння інтенсивності зміни вологовмісту та температури, проведений аналіз перерозподілів теплових потоків на нагрівання матеріалу та випаровування води в процесі сушіння, визначений вплив товщини шару на ефективність перетворення мікрохвильової енергії в теплову.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці, схема якої представлена на рис. 1. Для рівномірного нагрівання матеріалу застосовують його переміщення за об'ємом робочої камери.

У робочу камеру прямокутного перерізу розмірами $306 \times 201 \times 322$ мм надходила енергія через хвилевід від магнетрона з частотою генерації $2,45$ ГГц і потужністю 800 Вт. Конструкція мікрохвильової (МХ) камери дозволяла одночасно з під-

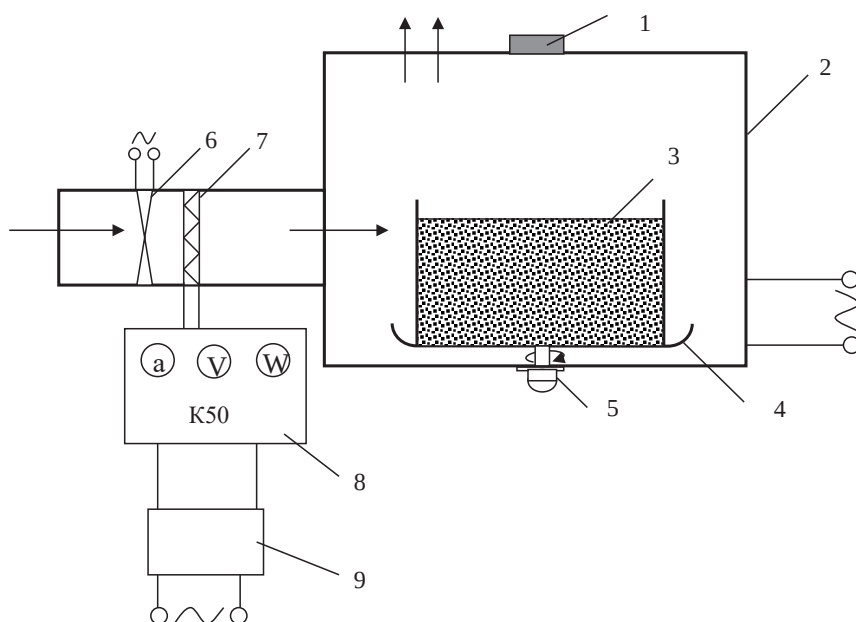


Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження процесу сушіння в мікрохвильовому полі [18]: 1 – хвилевід; 2 – робоча камера; 3 – експериментальна комірка; 4 – підставка; 5 – механізм приводу; 6 – вентилятор; 7 – нагрівач; 8 – вимірювальний комплект; 9 – регулятор напруги

веденням МХ енергії здійснювати продування повітря над шаром. В експериментальну комірку поміщався досліджуваний матеріал, який оброблявся в мікрохвильовій камері. Через інтервали часу 30 с ваговим методом визначалася поточна маса цеоліту і розраховувалася кількість вологи, що випарувалася, і вологовміст цеоліту.

Вимірювання температури проводилися за допомогою мультиметра АССТА АТ-280, щуп якого розташовувався у шарі цеоліту безпосередньо відразу після вимкнення магнетрону. Похибка визначення середньоінтегрального вологовмісту складала $\pm 2,7\%$, середньої температури шару $\pm 3,5\%$. Дослідження проводилися на цеолітах 13Х, частинки яких були різної форми: циліндричної – 13Х_ц (рис. 2а) та сферичної – 13Х_с (рис. 2б).

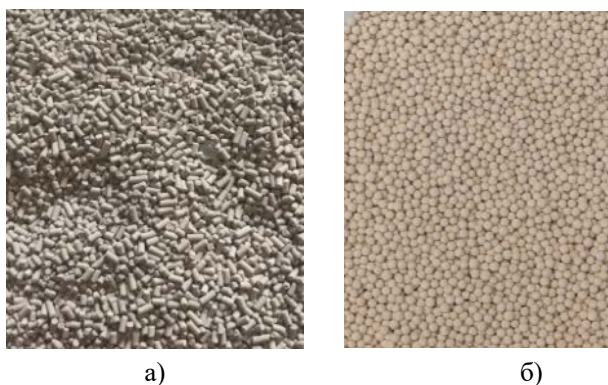


Рис. 2. Цеоліти, обрані для проведення експерименту: а – 13Х_ц, частинки циліндричної форми, б – 13Х_с, частинки сферичної форми

При обробці даних визначають такі величини:
– маса вологи, яка випарувалася:

$$\Delta m = m_i - m_{i+1}, \text{ кг} \quad (1)$$

– поточний вологовміст:

$$u_i = \frac{m_{\text{вол.}i}}{m_{\text{сух}}}, \text{ кг/кг} \quad (2)$$

де $m_{\text{вол.}i}$ – маса вологи в матеріалі на i -му вимірі, $m_{\text{сух}}$ – маса сухого матеріалу.

Кількість теплоти, яка пішла на випаровування вологи та нагрівання досліджуваного зразка (корисний тепловий потік, $Q_{\text{кор}}$) визначається залежністю:

$$Q_{\text{кор}} = (\Delta m_i \cdot r + m_i \cdot c_{\text{вол.}i} \cdot \Delta t) / \tau_i, \text{ Вт} \quad (3)$$

де r – питома теплота пароутворення, $c_{\text{вол.}i}$ – теплоємність вологого матеріалу, τ_i – час i -ї обробки, Δt – зміна температури цеоліту.

ККД процесу перетворення мікрохвильової енергії в теплову, який визначався як співвідношення корисного теплового потоку і вихідної

потужності магнетрону P , дозволяє оцінити ефективність використання мікрохвильової енергії:

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{P}, \% \quad (4)$$

Результати розрахунку характеристик сушіння цеоліту 13Х_с в мікрохвильовому полі наведена в табл. 1, де u – вологовміст, $c_{\text{вол.}i}$ – теплоємність вологого цеоліту, $m_{\text{ц}}$ – маса вологого цеоліту, Δm – маса води, що випарувалася.

Таблиця 1

Результати експериментального дослідження сушіння цеоліту 13Х_с у мікрохвильовому полі

$\tau, \text{с}$	$m_{\text{ц}}, \text{г}$	$\Delta m, \text{г}$	$t, ^\circ\text{C}$	$u, \text{кг/кг}$	$c_{\text{вол.}i}, \text{кДж/кг}\cdot\text{K}$	ККД
0	100	-	22,8	0,163	1,5216	
30	99	1	61	0,151	1,4832	0,33
60	98	1	85	0,140	1,4464	0,24
90	95	3	99	0,105	1,336	0,36
120	93	2	120	0,081	1,2592	0,29
150	92	1	145	0,070	1,22336	0,31
180	89	3	170	0,035	1,11168	0,38

Середній ККД перетворення МХ енергії в теплову складає 31%. Відносно низький ККД обумовлений малою товщиною шару, яка складала $\delta = 5$ мм. Питома теплоємність шару вологого цеоліту $c_{\text{вол.}i}$ розраховувалася за правилом адитивності з урахуванням вологовмісту u :

$$c_{\text{вол.}i} = c_{\text{сух.ц}}(1 - u) + c_{\text{в}} \cdot u, \quad (5)$$

де $c_{\text{сух.ц}}$ – теплоємність сухого цеоліту, $c_{\text{в}}$ – теплоємність води.

На рис. 3 представлена діаграма розподілу теплоти, яка витрачається на випаровування води та нагрівання цеоліту 13Х_с масою 100 г в задані проміжки часу при МХ сушінні. Витрата теплоти на випаровування води з шару цеоліту визначається першим доданком в рівнянні (3), а витрата теплоти на нагрівання другим доданком.

Аналіз діаграми показує, що на початку процесу сушіння більша частка енергії від магнетрону витрачається на нагрівання цеолітів, а менша – на випаровування вологи. При $t \geq 90$ с значно зростає витрата теплоти на випаровування, що пов'язано з ростом температури шару (табл. 1).

Результати розрахунку характеристик сушіння цеоліту 13Х_ц в мікрохвильовому полі наведена в табл. 2.

Середній ККД перетворення МХ енергії в теплову складає 30%. Товщина шару, як і для шару цеоліту 13Х_с, складала $\delta = 5$ мм. Для визначення впливу товщини шару на ефективність

Таблиця 2

Результати експериментального дослідження сушіння цеоліту 13X_ц в мікрохвильовому полі

τ , с	$m_{ц}$, г	Δm , г	t , °C	u , кг/кг	$C_{вол.і}$, кДж/кг·K	ККД
0	100		23,3	0,124	1,3968	
30	99	1	51	0,112	1,3584	0,25
60	98	1	140	0,090	1,288	0,46
90	95	3	150	0,067	1,2144	0,33
120	93	2	165	0,045	1,144	0,25
150	92	1	170	0,034	1,1088	0,21

перетворення МХ енергії в теплову були проведені експерименти з шаром цеолітів з тою же масою (100 г), але з більшою товщиною шару $\delta = 22$ мм за рахунок використання експериментальної комірки меншого діаметра. Отримано, що ККД зросло до 50%, тобто в 1,7 рази. Це свідчить

про важливість раціонального формування шару зі створенням умов для вільного виходу вологи в процесі сушіння. Надмірне збільшення товщини шару призводить до погіршення процесу сушіння внаслідок утруднення виходу вологи із шару, тому необхідно знаходити оптимальну товщину шару з урахуванням його діелектричних характеристик.

В процесі сушіння шару цеоліту вологовміст стрімко падає (табл. 1, табл. 2), проте температура цеолітів на протязі всього експерименту зростає, що дозволяє зробити висновок про високий коефіцієнт діелектричних втрат цеоліту 13X.

На рис. 4 представлена діаграма розподілу теплоти, яка витрачається на випаровування води та нагрівання цеоліту 13X_ц масою 100 г в задані проміжки часу при МХ сушінні.

Отримано, що ККД мікрохвильового сушіння цеолітів 13X_с та 13X_ц практично не відрізняється,

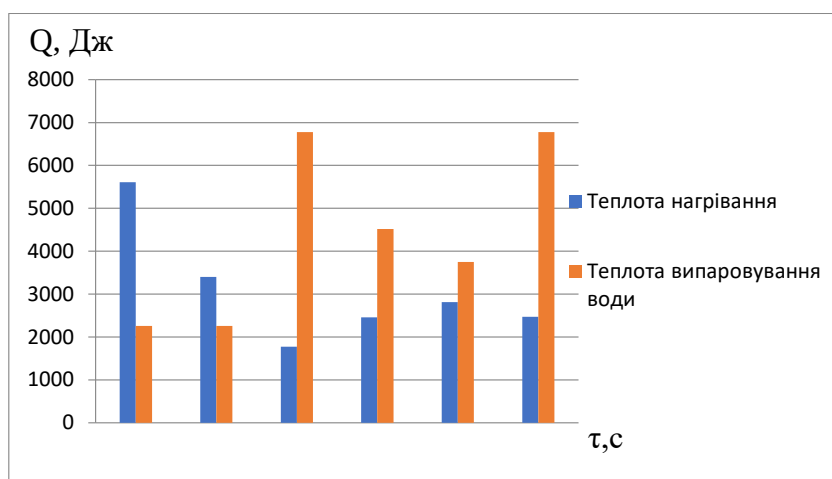


Рис. 3. Діаграма розподілу теплоти випаровування води та нагрівання цеоліту 13X_с масою 100 г в задані проміжки часу при сушінні в МХ полі

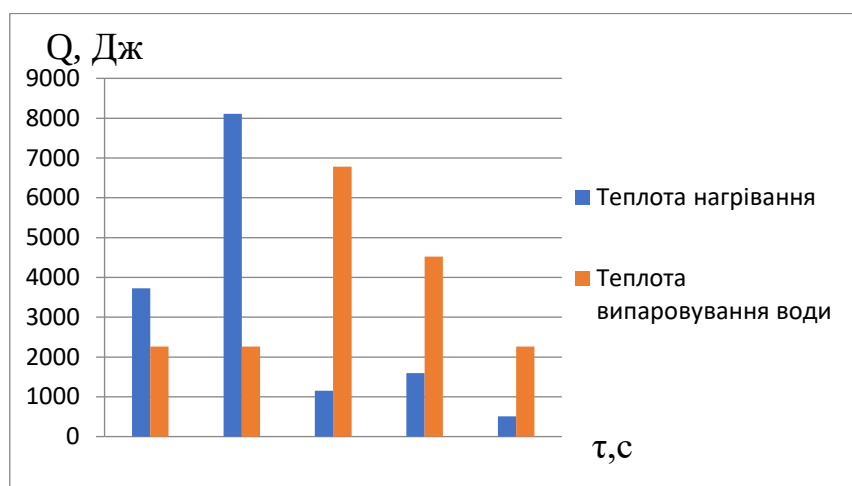


Рис. 4. Діаграма розподілу теплоти випаровування води та нагрівання цеоліту 13X_ц масою 100 г в задані проміжки часу при сушінні в МХ полі

внаслідок чого можна зробити висновок, що форма зерен не впливає на інтенсивність сушіння.

В ході досліджень спостерігалось, що цеоліт $13X_c$ характеризується більшою міцністю в порівнянні з $13X_{ц}$. В результаті багаторазового сушіння в МХ полі не виявлено руйнування зерен $13X_c$, в той же час в шарі цеоліту $13X_{ц}$ було виявлено наявність пилу, що свідчить про деяке руйнування зерен. Це пов'язано з різними виробниками та різними технологічними режимами виробництва.

Висновки. При мікрохвильовому сушінні цеолітів сферичної форми зерен $13X_c$ та зерен циліндричної форми $13X_{ц}$ не виявлено суттєвих відмінностей в інтенсивності зміни вологовмісту та температури.

При товщині шару $\delta=5$ мм цеолітів $13X_c$ та $13X_{ц}$ масою 100 г середній ККД перетворення

МХ енергії в теплову складає 30%. Зі збільшенням товщини шару до $d=22$ мм ККД зросло до 50%, тобто в 1,7 рази. Це свідчить про важливість раціонального формування шару зі створенням умов для вільного виходу вологи в процесі сушіння.

Надмірне збільшення товщини шару призводить до погіршення процесу сушіння внаслідок утруднення виходу вологи з шару, тому необхідно знаходити оптимальну товщину шару з урахуванням його діелектричних характеристик.

Цеоліт $13X_c$ характеризується більшою міцністю в порівнянні з $13X_{ц}$. В результаті багаторазового сушіння в МХ полі не виявлено руйнування зерен $13X_c$, в той же час в шарі $13X_{ц}$ було виявлено наявність пилу внаслідок часткового руйнування зерен цеоліту.

Список літератури:

1. Microwave synthesis of zeolites and their related applications / X. Zeng et al. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021. Vol. 323. P. 111262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111262>
2. Cherbański R., Molga E. Intensification of desorption processes by use of microwaves—An overview of possible applications and industrial perspectives. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2009. Vol. 48, no. 1. P. 48–58. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2008.01.004>.
3. The Development and Application of Microwave Heating / ed. by W. Cao. InTech, 2012. 226 p. URL: <https://doi.org/10.5772/2619>.
4. Intensification of TSA processes using a microwave-assisted regeneration step / E. Meloni et al. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2021. Vol. 160. P. 108291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2020.108291>.
5. Rhodes C. J. Properties and applications of Zeolites. *Science Progress*. 2010. Vol. 93, no. 3. P. 223–284. URL: <https://doi.org/10.3184/003685010x12800828155007>.
6. Kordala N., Wyszowski M. Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications. *Molecules*. 2024. Vol. 29, no. 5. P. 1069. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>.
7. Pérez-Botella E., Valencia S., Rey F. Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects. *Chemical Reviews*. 2022. P. 17647–17695. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00140>.
8. Modification of Gold Zeolitic Supports for Catalytic Oxidation of Glucose to Gluconic Acid / A. Walkowiak et al. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 18. P. 5250. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14185250>.
9. The International Natural Zeolite Association (INZA). URL: <https://www.inza.it/>.
10. Cowper C. J. Gas analysis: gas chromatography. *Encyclopedia of Separation Science*. 2000. P. 2925–2932. URL: <https://doi.org/10.1016/b0-12-226770-2/00491-9>.
11. Sircar S. Drying Processes. *Handbook of Porous Solids*. Weinheim, Germany. P. 2533–2567. URL: <https://doi.org/10.1002/9783527618286.ch32>.
12. Zeolites and Other Adsorbents / E. Pérez-Botella et al. *Nanoporous Materials for Gas Storage*. Singapore, 2019. P. 173–208. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3504-4_7.
13. MgBemere, H.E.; Ekpe, I.C.; Lawal, G.I. Zeolite synthesis, characterizations, and application areas: A review. *Int. Res. J. Environmental Sci.* 2017. Vol. 6(10). P. 45–59.
14. Adsorption performance and thermodynamic analysis of SAPO-34 silicone composite foams for adsorption heat pump applications / L. Calabrese et al. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. 2018. Vol. 7, no. 4. URL: <https://doi.org/10.1007/s40243-018-0131-y>.
15. Erprobung eines thermochemischen Langzeitwärmespeichers auf Basis eines Zeolith/Salz-Komposits / T. Nonnen et al. *Chemie Ingenieur Technik*. 2016. Vol. 88, no. 3. P. 363–371. URL: <https://doi.org/10.1002/cite.201500136>.
16. Zeolite Heat Storage: Key Parameters from Experimental Results with Binder-Free NaY / S. Rönsch et al. *Chemical Engineering & Technology*. 2020. Vol. 43, no. 12. P. 2530–2537. URL: <https://doi.org/10.1002/ceat.202000342>.

17. Cherbański R. Calculation of Critical Efficiency Factors of Microwave Energy Conversion into Heat. *Chemical Engineering & Technology*. 2011. Vol. 34, no. 12. P. 2083–2090. URL: <https://doi.org/10.1002/ceat.201100405>.
18. Експериментальне дослідження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі / І. Л. Бошкова та ін. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2023. Т. 59, № 3. С. 197–204. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.
19. Microwave-induced regeneration of activated carbons polluted with phenol. A comparison with conventional thermal regeneration / C. O. Ania et al. *Carbon*. 2004. Vol. 42, no. 7. P. 1383–1387. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.01.010>.
20. Experimental and Numerical Assessment of a Novel All-In-One Adsorption Thermal Storage with Zeolite for Thermal Solar Applications / M. Di Palo et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 23. P. 8517. URL: <https://doi.org/10.3390/app10238517>.

Boshkova I.L., Volgusheva N. V., Hrechanovskyi A.P., Borets S.O., Tortika D.M. STUDY OF THE DRYING FEATURES OF ZEOLITES 13X IN A MICROWAVE FIELD

It is proven that zeolites currently have a wide range of applications due to their properties, such as available void space and large pore surface area, zeolites are of particular interest for thermochemical heat storage due to the ability to provide high energy density. It is known that for repeated use of zeolites, it is necessary to carry out energy-efficient and fast regeneration, which is based on the desorption process. It is emphasized that the regeneration of zeolites is the most important stage that determines the efficiency of the entire process in which adsorption is involved. It is determined that microwave heating can be used to carry out the regeneration process of zeolites, which has many advantages compared to convective heating, for example, direct and volumetric heating of the irradiated material, as well as selective heating, however, the regeneration of zeolites in a microwave field has not been studied sufficiently, especially in terms of the energy effect of the interaction of the microwave field with the material under study. It is known that the lack of knowledge about the thermal effect of drying zeolites in a microwave field is a problem that does not allow their industrial implementation in a number of specific areas, in particular, in technologies of thermochemical heat storage. The experimental methodology and experimental setup for studying the drying of zeolites 13 X, the particles of which were of different shapes: cylindrical and spherical, in a microwave field are presented. The change in temperature and moisture content over time is analyzed, as well as the results of calculating the amount of heat of moisture evaporation and heating of the sample under study, which determine the useful heat flux. Data are presented on the efficiency of the process of converting microwave energy into heat, which is defined as the ratio of the useful heat flux and the output power of the magnetron. The importance of rational formation of the zeolite layer for increasing the energy efficiency of the dehydration process is determined.

Key words: energy efficiency, microwave heating, drying, moisture content, temperature, heat.

Дата надходження статті: 05.09.2025

Дата прийняття статті: 16.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Рачинський А.Ю.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ У ВЕРХНЬОМУ БАРАБАНІ КОТЛА ДКВР 10-13

У статті представлено результати чисельного дослідження процесу сепарації водяної пари в барабані котельного агрегату типу ДКВР 10-13, виконаного з використанням CFD-моделювання у безкоштовній студентській версії програмного комплексу ANSYS Student. Через обмеження версії моделюванню підлягала частина циліндричної оболонки барабана, що містить патрубки підведення пароводяної суміші з екранних труб та відведення сухої насиченої пари. Як граничні умови задано характеристики потоку пароводяної суміші, що надходить з екранних труб. Моделювання турбулентності здійснювалося за $k-\epsilon$ моделлю в модифікації Realizable. Дисперсна фаза представлена у вигляді сферичних крапель, що описуються методом DPM (Discrete Phase Model) у лагранжевому формулюванні з урахуванням інерції, гідродинамічного опору та сили тяжіння. Безперервна фаза (пара) моделювалася на основі рівнянь Нав'є–Стокса. Для опису взаємодії між фазами застосовано модель тертя Schiller–Naumann та теплообміну Ranz–Marshall. За результатами моделювання отримано нові дані про динамічні процеси взаємодії потоків води та пари в замкнутому об'ємі барабана в умовах впливу високих температур у нижній його частині. Визначено розподіл об'ємного паровмісту по висоті барабана, що дало змогу встановити положення дзеркала випаровування – важливий параметр для оцінки сольового балансу котлоагрегату. Через відсутність експериментальних даних адекватність моделі оцінювалася на основі вимог експлуатації барабанів даного типу. Визначено, що взаємодія струменів пароводяної суміші, яка направляється з екранних труб і рух пари від нижньої частини барабану створює умови порушення сольового балансу в барабані, що в свою чергу сприяє потраплянню забруднюючих частинок, які розчинені в котловій воді в пароперегрівач, а потім і в проточну частину турбіни.

Ключові слова: теплообмін, моделювання, пара, фазовий перехід, дзеркало випаровування.

Постановка проблеми. Представлена робота присвячена моделюванню параметрів пароводяної суміші, що поступає в об'єм барабана котла типу ДКВР 10-13 і знаходиться в умовах впливу високих температур розжарених газів в нижній частині барабану. Такі умови характерні для котла ДКВР 10-13.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність обраної тематики підтверджується значною кількістю публікацій та високим рівнем наукових досліджень, виконаних ученими з усього світу. У роботі [1] автор запропонував основні ідеї та рівняння для динамічного моделювання барабана котла теплових електростанцій. Модель ґрунтується на фундаментальних законах збереження маси та енергії, застосованих одночасно до фаз пари та води. Підхід до моделювання, заснований на фізичних рівняннях, природним чином приводить до опису процесів у просторі станів, що є зручним для подальшого чисельного аналізу та інтеграції в системи CFD-моделювання.

Однією з ключових проблем експлуатації барабанних котлів є складність точного опису та контролю процесів пароутворення. Через нелінійний характер динаміки тепло- та масообміну, а також складні зв'язки між термодинамічними властивостями рідини та пари, прогнозування поведінки системи потребує застосування детальних математичних моделей. Процеси, що відбуваються під час випаровування, є складними й характеризуються нелінійними залежностями між параметрами тепло- та масообміну. Важливі технологічні характеристики, такі як точка висихання або ступінь перегріву, є важковимірюваними, що ускладнює побудову ефективних систем керування. Результати експериментальних і чисельних досліджень [2] показують, що у таких системах можуть виникати різні типи нестабільностей та коливань потоку, що вимагає врахування під час моделювання та експлуатації котлоагрегатів.

Крім того, на стабільність роботи циркуляційного контуру впливають такі фактори, як зміни теплового навантаження, нерівномірність нагріву, коливання тиску та витрати теплоносія. Це зумовлює виникнення гідродинамічних нестійкостей, включаючи коливання витрати в циркуляційних трубах, що може призводити до зниження ефективності теплообміну та навіть аварійних ситуацій.

В доступній літературі автори надають значну увагу розробці законів керування рівнем в барабані котла. Наприклад, автори [3] розробили модель котла цукрового заводу Proserpine Mill компанії Wilmar Sugar, що працює в умовах дуже змінних навантажень. Параметри моделі можна отримати безпосередньо з фізичних характеристик будь-якого котла. Авторами описано наслідки моделі для керування котлом з особливим акцентом на зменшення коливань рівня води в барабані при великих та швидких змінах потоку пари. Експериментальні результати котла на цукровому заводі Proserpine Mill компанії Wilmar Sugar підтвердили покращення коливань рівня води в барабані, досягнуті завдяки оновленому закону керування.

В доступній літературі є велика кількість робіт присвячених, як і вище згадані, моделюванню динаміки барабанного котла. Також відомо про достатню кількість досліджень присвячених управлінню рівнем в барабані [4, 5]. Наявність таких робіт свідчить про актуальність тематики представленої статті і є наступним кроком після визначення структури потоків в барабані котла типу ДКВР і форми та розташування дзеркала випаровування в ньому.

Роботи, що присвячені розробці математичних моделей для котлів барабанного типу теж представлені в значній кількості [6-8]. Хоча предметом дослідження в них не барабан котла типу ДКВР, але основні наукові результати можна використати і в цій статті в якості верифікації. Наприклад

роботу [9], в якій автор виконав моделювання розподілу води в паровому барабані та системі подавальних труб, а також перенесення крапель у газову фазу в турбулентній області розділення барабана. Його моделювання свідчить, що точність моделі розподілу частинок у взаємодії з силами опору та неопірними силами здатна відтворювати горизонтальні та вертикальні картини потоку, що отримані авторами експериментальної роботи [10]. Згадані дані візуалізації можна спиратись в даній статті для верифікації результатів моделювання.

Метою статті є отримання нових даних щодо динамічних процесів взаємодії потоків води і її пари в замкнутому об'ємі барабана котла типу ДКВР 10-13 в умовах впливу високих температур розжарених газів в нижній частині барабану, що обумовлено конструктивними особливостями ДКВР 10-13.

Метод дослідження – комп'ютерне моделювання руху фронтів води і її пари, що потрапляють в об'єм верхнього барабану котла ДКВР 10-13, що розташований над паливною котла. Комп'ютерне моделювання виконувалось в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, що є абсолютно безкоштовним (з 2015 року) і призначеним для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об'єкт дослідження – це процеси теплообміну і гідродинаміки, що мають місце в барабані котла типу ДКВР 10-13 в умовах впливу високих температур розжарених газів в нижній циліндричній частині барабану.

Предмет дослідження – є термодинамічні параметри пароводяної суміші в середині барабану котла ДКВР 10-13.

Виклад основного матеріалу. Двофазні режими потоку використовуються в енергетичних системах, системах теплопередачі, в теплових

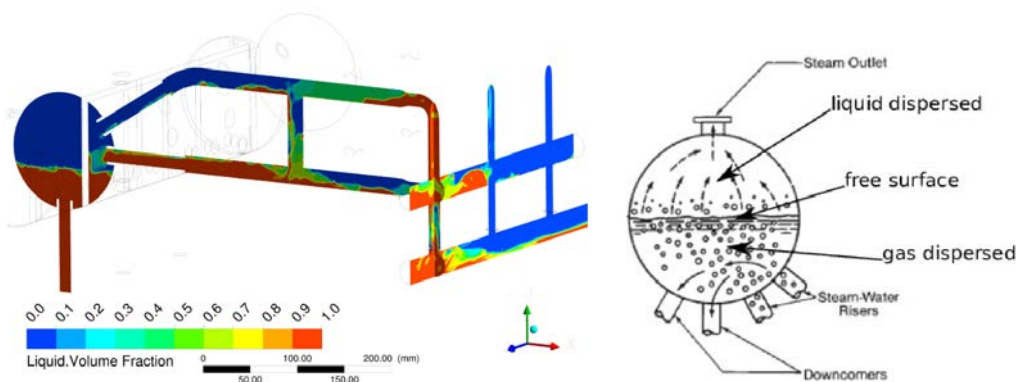


Рис. 1. Візуалізація розподілу пара/вода [10] (а) та схема потоку в паровому барабані з природним розділенням пари/води [9] (б)

мережах і при дослідженні геометеорологічних явищ. Отже, багатофазний потік має величезне значення для проектування парових котлів, оскільки він дозволяє прогнозувати експлуатаційні межі, стабільність процесу і запобігання пошкодженням обладнання котельного агрегату.

Динаміка рідини у всіх вищезазначених випадках по суті регулюється подібними фізичними законами, тобто рівняннями балансу імпульсу та маси. Ці рівняння балансу можна розв'язати за допомогою ресурсоємких числових алгоритмів [9].

Для створення моделі пароводяного потоку середині об'єму барабану котла використана студентська версія ANSYS CFX. ANSYS CFX – це програмне забезпечення для CFD, яке базується на нестационарних рівняннях Нав'є-Стокса в їхній консервативній формі. Окрім рівнянь Нав'є-Стокса, для розв'язання системи рівнянь потрібні рівняння стану. Для моделювання, що включає багатокомпонентний потік, багатофазний потік або рідину зі змінною щільністю, активована модель плавучості. Математичний опис згаданих рівнянь приводиться в довідковій літературі [11, 12] є достатньо взнаваним і не приводиться в тексті даної статті оскільки її авторами не є їх розробниками.

Рівняння Нав'є-Стокса є зв'язаними нелінійними диференціальними рівняннями з частинними похідними, які необхідно дискретизувати числовими методами для розв'язання за допомогою комп'ютерів [9]. Тому моделі передусє геометрична модель, що побудована на основі креслень барабану котла ДКВР 10-13 [13], які розміщені в відкритому доступі (рис. 2). Розрахунковою областю є континуум всередині барабану. Входи/виходи з барабану пароводяної суміші, води і її

пари виконані у вигляді циліндричних виступів (рис. 2), що відповідають внутрішнім діаметрам відповідних отворів, що приведені на робочих кресленнях [13].

Оскільки з-за обмежень ресурсу персональних комп'ютерів і власне ANSYS Student не є можливим виконання обчислень на повній копії комп'ютерній барабану, тому автори обмежились його ділянкою, встановивши на бічних площинах розрізу симетричні граничні умови (рис. 3).

При завданні граничних умов за допомогою Нормативного методу аналітично розраховано швидкість і температуру двофазної суміші, що надходить з труб, що екранують паливну котла ДКВР 10-13 (позначено синіми стрілками на рис. 3б). Прогнозується, що в моделі, пара сепарується від рідини за рахунок різниці густин всередині об'єму барабану і під дією підйомної архімедової сили рухається до верхньої частини барабану де з площини (позначено оранжевою стрілкою на рис. 3б). В роботі [14] визначено температурне поле частини барабану, яка контактує з розжареними газами в паливні. Значення температур на цьому відрізку циліндричного днища барабану осередненні по поверхні і використані у вигляді температурних граничних умов (позначено червоними стрілками на рис. 3б).

З-зовні корпус барабану теплоізолюваний, тому на його поверхні задавались адіабатичні граничні умови.

Відомо, що ANSYS CFX зберігає всі невідомі у вузлах, а не в центральних точках. Ця процедура призводить до контрольного об'єму, який має більше балансових граней, ніж комірка геометричної сітки, і виглядає як багатогранник. Завдяки більшій кількості балансових граней та

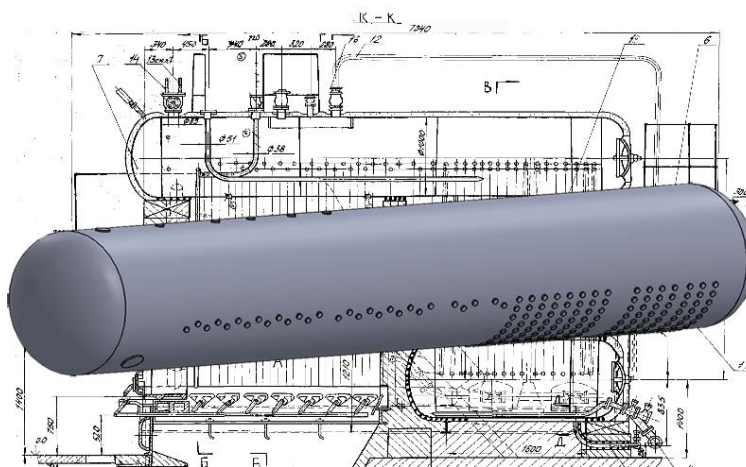


Рис. 2. Вид розрахункової області для барабану котла ДКВР 10-13

сусідніх комірок апроксимація градієнтів набагато краща. Отже, градієнти, що мають місце на межі розділу, розв'язуються з більшою точністю та стабілізують процес числового розв'язання. Цей останній факт є перевагою ANSYS CFX для моделювання багатофазних потоків.

Обговорення отриманих результатів. Згідно попередніх аналітичних розрахунків, що виконані за допомогою Нормативного методу, з екранних труб подається в об'єм барабана котла пароводяної суміші зі швидкістю 0,5 м/с і температурою 70°C. Процес відокремлення води від пари наглядно демонструється розподілом об'ємної долі компоненту двофазної суміші (Volume

Fraction рис. 4а і б) в поперечному перерізі барабану. Площина поперечного перерізу вибрана так, щоб проходила крізь отвір для виходу пари так і крізь отвори для впорскування пароводяної суміші.

Аналіз даних рис. 4 свідчить, що фракція води знаходиться тільки в струменях потоку, що направляється з екранних труб. Також в нижній циліндричній частині барабану спостерігається прошарок води, яка стікає по стінкам барабана з розжареною газами стінкою – вода майже миттєво випаровується, тому така тонка область з водою. Вода наявна тільки в струменях, що направляються з екранних труб і в тонкій області

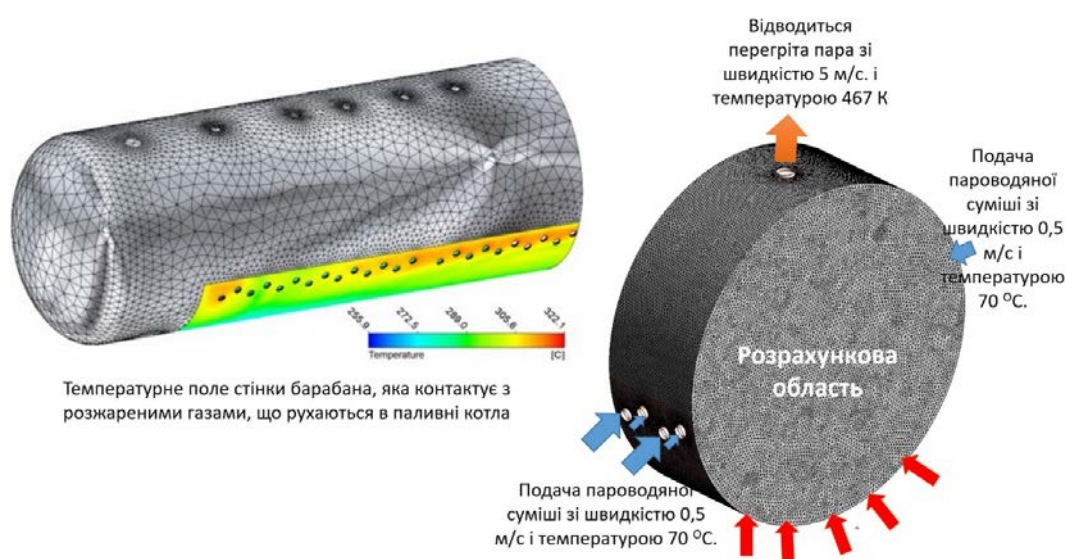


Рис. 3. Розрахункове поле температур у нижній частині барабану котла ДКВР 10-13 (а) [14] та розрахункова область моделі з граничними умовами (б)

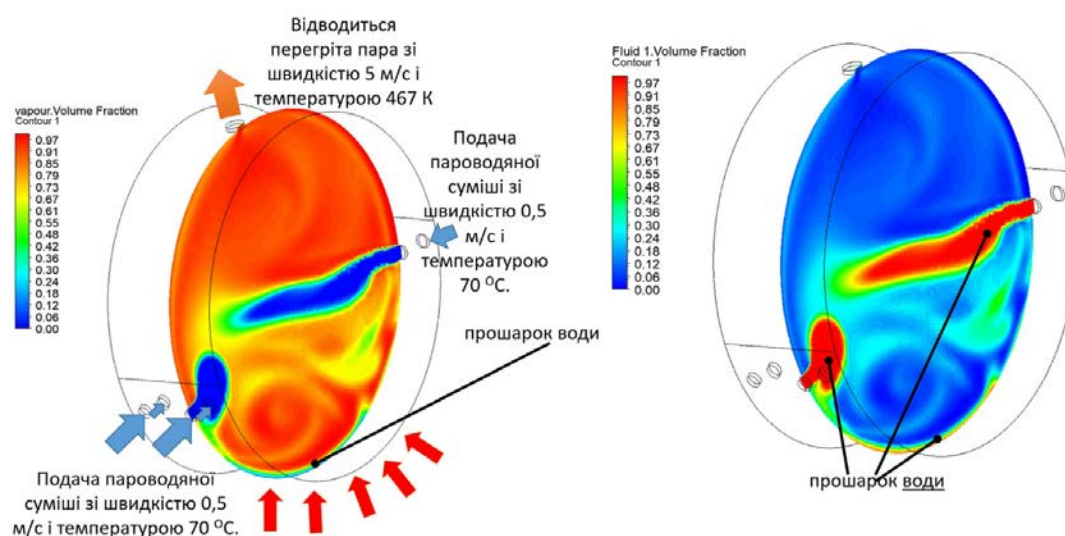


Рис. 4. Розподіл парової (а) і рідкої (б) фаз води в поперечному перерізі по центру барабана

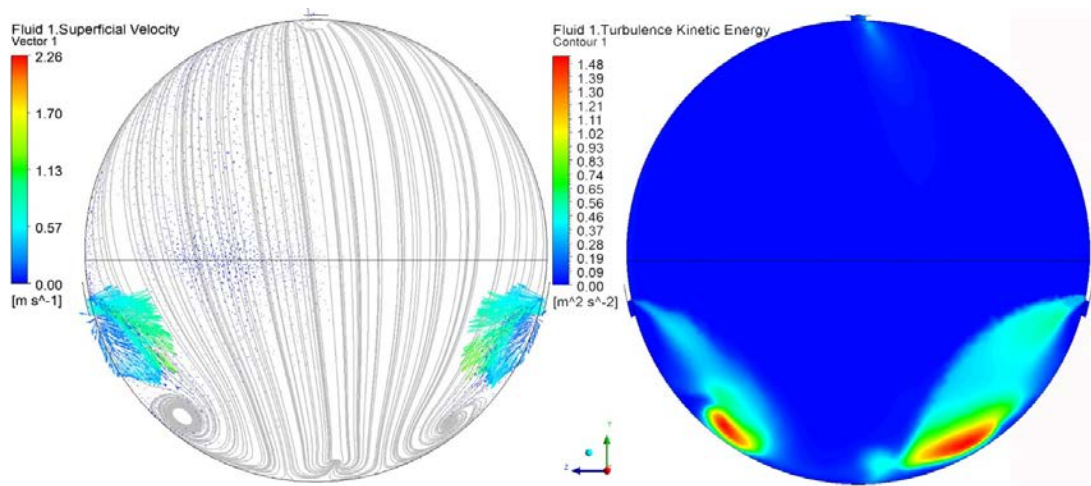


Рис. 5. Розподіл траєкторій руху води (а) і кінетичної енергії турбулентних пульсацій частинок води (б) в центральному поперечному перерізі барабану

в нижній частині барабану, куди вона стікає під дією сили тяжіння. Отже, пароводяна суміш, що потрапляє в барабан з труб бічних екранів охолоджує стінки верхнього барабану і захищає метал від дії розжарених газів в паливні котла.

Власне рух води, після сепарації її з пароводяної суміші ілюструє рис. 5а. Де показано як краплі води, що мають достатньо високу кінетичну енергію (до $0,5 \text{ м}^2/\text{с}^2$ рис. 5б) осідають на нижній циліндричній частині барабану, звідки під дією високих температур ($\approx 300^\circ\text{C}$ рис. 3а) випаровуються і рухаються в сторону патрубка виходу пари, що розміщений в верхній частині барабану.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що в даній задачі досить складно в визначити висоту розташування дзеркала випаровування (геометричного місця крапель вологи які створюють суцільну поверхню). В даній постановці задачі фронт рідини постійно змивається струменями пари які сепаруються з потоку пароводяної суміші, що поступає з бічних екранів і потоками

пари, яка підіймається від нижньої циліндричної частини барабана.

Висновки. Моделювання течії і теплообміну в секції верхнього барабану котла ДКВР 10-13 дозволяє зробити наступні висновки:

- внаслідок контакту нижньої частини барабану котла з розжареними газами паливні (конструктивні особливості котла ДКВР) призводить до закипання води і вторинної генерації пари;

- взаємодія струменів пароводяної суміші, яка направляється з екранних труб і рух пари від нижньої частини барабану створює умови порушення сольового балансу в барабані, що в свою чергу сприяє потраплянню забруднюючих частинок, які розчинені в котловій воді в пароперегрівач, а потім і в проточну частину турбіни.

Після подолання обмежень від студентської версії ANSYS автор планує покращити модель, шляхом моделювання течії в двоступеневій системі випаровування з установкою в другому ступені виносних циклонів.

Список літератури:

1. Lazaroiu Gheorghe. Dynamic modelling of steam boiler drum. *Revue Roumaine des Sciences Techniques «Politehnica» University of Bucharest*. 1999. No. 44(1). pp. 101–109.
2. Wen Tan, Horacio J. Marquez, Tongwen Chen, Jizhen Liu. Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit. *Journal of process control*. 2005. Vol. 15. P. 883–891 DOI:10.1016/j.jprocont.2005.03.007.
3. Carrasco D.S., Goodwin G.C., Peirce R.D. Novel modelling for a steam boiler under fast load dynamics with implications to control. *Automatica*. 2023. Vol 156. P. 1–7 <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2023.111184>
4. Tawfeic S. R., Boiler Drum-Level Modeling. *JES Journal of Engineering Sciences*. Vol. 41(No. 5), pp. 1812–1829. DOI: 10.21608/jesaun.2013.114911.
5. Sumalatha A., K Sudha Rani, Jayalakshmi Ch. Dynamic modeling of Boiler drum using nonlinear system identification approach. *Measurement Sensors*. 28(9). 100845 DOI: 10.1016/j.measen.2023.100845
6. Zhang M.H., Chu K.W., Wei F., Yu A.B. A CFD–DEM study of the cluster behavior in riser and downer reactors. *Powder Technology*. 2008. Vol. 184. Issue 2. P. 151–165. DOI:10.1016/j.powtec.2007.11.036.
7. Deghal Cheridi A.L., Dadda A., Bouam A., Dahia A. Transient Simulation of an Industrial Steam Boiler. *Algerian Journal of Signals and Systems*. 2022. 7, 2 (Jun. 2022), 77–83. DOI: <https://doi.org/10.51485/ajss.v7i2.164>.

8. Liu H. T., Koçak H., Kakaç S. Dynamical analysis of pressure-drop type oscillations with a planar model. *International Journal of Multiphase Flow*. 1995. Vol. 21. Issue 5. P. 851–859 [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(95\)00012-M](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00012-M).
9. Nowitzki M. Development and validation of a gas-liquid two-phase model for industrial computational fluid dynamics applications. Thesis for: Doctoral / Technical University of Applied Sciences Wildau. Deutschland. 2020. 228 p. DOI: 10.26127/BTUOpen-5413.
10. Kitto John B., Stultz eds. *Steam: Its generation and use*. 41. ed., 1. print. Barberton, Ohio: Babcock & Wilcox. 2005. ISBN: 0963457012.
11. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide. New-York, USA: ANSYS Inc, 2012.
12. Versteeg Henk K., Weeratunge Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. 2. ed., [Nachdr.] Harlow: Pearson/Prentice Hall. 2007. ISBN: 9780131274983
13. Energetik. Steam boilers: boilers series DKVr with a pressure up to 1,3 MPa (gas, liquid, coal) DKVR-4-13, DKVR-6,5-13, DKVR-10-13, DKVR-20-13. URL: https://energetik.ua/en/catalog/parovi_kotly/dkvr-1-3/ Accessed: 11.12.2024 p.
14. Рачинський А. Ю. Баранюк О. В., Черноусенко О. Ю. (2025). Термонапружений стан барабану котла ДКВР-10-13 у разі заміни штатного пальника на струменеві-нішевий. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 1(178). С. 137–144. DOI: 10.31649/1997-9266-2025-178-1-137-144,

Rachynskyi A. Yu. MODELING OF WATER STEAM SEPARATION PROCESSES IN THE UPPER DRUM OF THE DKVR 10-13 BOILER

The article presents the results of a numerical study of the process of water vapor separation in the drum of a boiler unit of the DKVR 10-13 type, performed using CFD modeling in the free student version of the ANSYS Student software package. Due to version limitations, the part of the cylindrical shell of the drum containing the branch pipes for supplying the steam-water mixture from the screen tubes and removing dry saturated steam was subject to modeling. The characteristics of the steam-water mixture flow coming from the screen tubes were set as boundary conditions. Turbulence modeling was carried out using the $k-\epsilon$ model in the Realizable modification. The dispersed phase is represented in the form of spherical droplets, which are described by the DPM (Discrete Phase Model) method in the Lagrangian formulation taking into account inertia, hydrodynamic resistance and gravity. The continuous phase (vapor) was modeled based on the Navier-Stokes equations. The Schiller-Naumann friction model and Ranz-Marshall heat transfer model were used to describe the interaction between the phases. The modeling results obtained new data on the dynamic processes of interaction of water and steam flows in a closed volume of the drum under the influence of high temperatures in its lower part. The distribution of volumetric steam content along the height of the drum was determined, which made it possible to establish the position of the evaporation mirror – an important parameter for assessing the salt balance of the boiler unit. Due to the lack of experimental data, the adequacy of the model was assessed based on the requirements for the operation of drums of this type. It was determined that the interaction of jets of the steam-water mixture, which is directed from the screen tubes and the movement of steam from the lower part of the drum, creates conditions for disturbing the salt balance in the drum, which in turn contributes to the ingress of polluting particles dissolved in the boiler water into the superheater, and then into the flow part of the turbine.

Key words: heat transfer, modeling, steam, phase transition, evaporation mirror.

Дата надходження статті: 12.09.2025

Дата прийняття статті: 27.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Серденко Т.В.

Мукачівський державний університет

Бродович Ю.Р.

Мукачівський державний університет

Козарь О.П.

Мукачівський державний університет

Максютова О.В.

Мукачівський державний університет

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ЗАКАРПАТТІ: ПОТЕНЦІАЛ, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

У статті досліджено екологічні аспекти впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у Закарпатській області – одному з найбільш перспективних регіонів України з точки зору природно-кліматичних умов. Проаналізовано географічні та ресурсні передумови для розвитку сталих джерел енергії, зокрема гідроенергетики, вітрових та сонячних електростанцій, а також енергетичного використання біомаси. Автори наголошують, що впровадження ВДЕ сприяє скороченню викидів парникових газів, зниженню навантаження на довкілля, покращенню якості повітря, збереженню біорізноманіття та досягненню кліматичних цілей. Розвиток зеленої енергетики також створює додаткові можливості для регіонального розвитку, децентралізації енергопостачання та залучення інвестицій у гірські та сільські громади.

У роботі акцентовано увагу на низці екологічних ризиків, які супроводжують реалізацію проєктів ВДЕ. Серед основних проблем – порушення гідрологічного балансу річок при будівництві малих ГЕС, фрагментація екосистем, вплив на ландшафтний профіль територій, акустичне та візуальне навантаження від вітрових електростанцій, а також складність утилізації сонячних панелей та інших елементів енергетичного обладнання. Визначено, що за відсутності належного планування та екологічного моніторингу навіть відновлювані джерела можуть мати суттєвий негативний вплив на довкілля. У зв'язку з цим в статті обґрунтовано комплекс заходів для зменшення екологічних ризиків: запровадження стратегічної екологічної оцінки, інтеграція екологічних критеріїв у просторове планування, удосконалення законодавства у сфері охорони довкілля та залучення громадськості до процесів оцінювання і контролю.

Представлені результати можуть бути використані при формуванні регіональних енергетичних стратегій, екологічних програм та обґрунтуванні екобезпеки нових енергетичних проєктів на Закарпатті. Запропоновані підходи мають міждисциплінарний характер і можуть бути корисними для фахівців у галузі екології, енергетики, управління природними ресурсами та сталого розвитку.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, екологічні аспекти, екологічні ризики, Закарпатська область, малі ГЕС, вітрові електростанції, сталий розвиток.

Постановка проблеми. Перехід до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним із ключових завдань сучасної енергетичної політики України, що зумовлено глобальними кліматичними змінами, необхідністю підвищення енергетичної безпеки та забезпечення сталого розвитку [6; 7]. Використання ВДЕ дозволяє значно зменшити

викиди парникових газів, знизити рівень забруднення атмосферного повітря та ґрунтів, а також зберегти біорізноманіття регіонів [5; 8]. Закарпатська область, з огляду на свої унікальні природно-кліматичні умови – розвинену річкову мережу, високий рівень інсоляції, значний вітровий потенціал та наявність лісових і сільсько-

господарських відходів, має значний ресурсний потенціал для впровадження відновлюваних джерел енергії [1; 9].

Незважаючи на економічну доцільність і екологічні переваги ВДЕ, їхнє широке впровадження супроводжується низкою екологічних ризиків та викликів. До таких належать негативні наслідки зміни гідрологічного режиму малих річок під час будівництва ГЕС, вплив вітрових електростанцій на ландшафт, шумове навантаження та орнітологічні ризики, а також проблеми утилізації відпрацьованих елементів сонячних та вітрових установок [3; 8; 10]. У Закарпатті ці питання набувають особливої актуальності через високу чутливість карпатських екосистем і значну роль рекреаційних та природоохоронних територій у розвитку регіону [2; 4].

Широке впровадження ВДЕ на Закарпатті супроводжується низкою екологічних викликів: зміна гідрологічного режиму річок при будівництві ГЕС, вплив вітропарків на ландшафт і шумове забруднення, утилізація відпрацьованих елементів сонячних панелей і вітрогенераторів [8; 10]. Відсутність комплексної оцінки цих факторів може призвести до деградації природних систем, що суперечить принципам сталого розвитку регіону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні активно досліджується протягом останніх років як на національному рівні, так і в контексті окремих регіонів. Зокрема, детальний аналіз природно-ресурсного потенціалу Закарпатської області для використання ВДЕ подано в роботах Попа С. С. та Шароді І. С. [1], де обґрунтовано можливість освоєння малих гідроелектростанцій, сонячних електростанцій та біоенергетичних ресурсів регіону. Також автори звертають увагу на необхідність комплексного підходу до оцінювання впливу таких проєктів на навколишнє середовище.

У публікації А. В. Павлика [2] проаналізовано еколого-економічні наслідки використання ВДЕ в Україні, зокрема відзначено економічну доцільність впровадження «зеленої» енергетики та можливі екологічні ризики, пов'язані з використанням територій, зміною гідрологічних режимів, шумовим забрудненням і впливом на біорізноманіття. Окрему увагу автор приділяє необхідності оцінювання довгострокових наслідків і врахування соціально-економічних факторів під час реалізації таких проєктів.

Загальні екологічні проблеми Закарпаття та виклики, пов'язані з антропогенним навантажен-

ням, розкрито у збірнику «Екологічні проблеми Закарпаття» [3], де наголошено на важливості збереження гірських екосистем та попередженні деградації природного середовища в умовах зростання економічної активності. Це накладає обмеження й на освоєння ВДЕ, що потребує врахування специфіки регіону.

Стан та перспективи розвитку відновлюваних джерел енергії в Карпатському регіоні України в контексті цілей сталого розвитку було представлено в роботі Arkhyrova N. V., Hrek O. I., Korzhov M. O. [4]. Авторами виконано кількісну оцінку потенціалу різних видів ВДЕ, підготовлено картографічні матеріали та зазначено необхідність гармонізації економічних інтересів з екологічними вимогами.

Дослідження Mishchenko M., Lytvynenko O., Ivanov V. [5] містить огляд стану «зеленої» енергетики України, суспільного попиту на відновлювані джерела та тенденцій розвитку галузі. Автори підкреслюють високий рівень суспільної підтримки ВДЕ, а також визначають основні соціально-економічні й екологічні бар'єри на шляху їх упровадження.

Фінансові аспекти розвитку відновлюваної енергетики в Україні розглянуто у роботі Shcherbyna S., Olsen K. [6]. Автори аналізують джерела фінансування проєктів, зокрема державні програми, приватні інвестиції та міжнародну допомогу, підкреслюючи роль стійких фінансових механізмів для екологічно безпечного розвитку галузі.

Порівняльний аналіз екологічних і соціальних наслідків виробництва електроенергії з різних відновлюваних джерел представлено у роботі Ali S., Khan R., Chen W. [7], де детально описано вплив вітрових, сонячних, гідроенергетичних та біоенергетичних установок на довкілля й запропоновано підходи до мінімізації негативних ефектів.

Окремо слід відзначити дослідження Гаднадя І., Тара К. та Молнаря Й. [8], присвячене сучасному стану й перспективам розвитку вітрової енергетики у світі, Європі та в Україні, зокрема на Закарпатті. У роботі наведено дані про потенціал вітрових ресурсів регіону та відзначено низку проблем, пов'язаних із впливом на довкілля.

Питання використання біомаси як ресурсу для енергетики в Україні висвітлено у монографії під редакцією Гелетути Г. [9], де наведено технічні рішення та екологічні аспекти впровадження біоенергетичних технологій. Автори підкреслюють роль біоенергетики як одного з найбільш перспективних напрямів скорочення викидів CO₂.

Додатково у роботах Попа С. С. та Шароді І. С. [10] досліджено перспективи розвитку вітроенергетики саме Закарпатської області, проаналізовано технічні та екологічні обмеження розміщення вітропарків і запропоновано рекомендації щодо підвищення їх екологічної безпеки.

Таким чином, проведений аналіз свідчить про значну увагу науковців до проблематики розвитку відновлюваної енергетики, однак більшість досліджень зосереджені на окремих її аспектах: технічних характеристиках, економічній ефективності чи окремих видах ВДЕ. Недостатньо розробленими залишаються комплексні підходи до оцінювання екологічних наслідків впровадження ВДЕ в умовах чутливих екосистем Карпатського регіону, що й зумовлює актуальність даного дослідження.

Метою статті є аналіз екологічних аспектів розвитку відновлюваних джерел енергії на Закарпатті, виявлення їхніх переваг та ризиків, а також формулювання напрямів підвищення екологічної безпеки та сталості розвитку енергетики регіону.

Виклад основного матеріалу. Дослідження показало, що сучасна структура використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на Закарпатті залишається фрагментарною та нерівномірною як за типами джерел, так і за територіальним розподілом. Це зумовлено низкою факторів: відсутністю цілісної регіональної енергетичної стратегії, обмеженим доступом до інвестицій у віддалених гірських громадах, технічними бар'єрами підключення до електромереж та складною процедурою оцінки впливу на довкілля для нових проєктів. Найбільш освоєною на сьогодні залишається мала гідроенергетика. Кількість малих гідроелектростанцій (ГЕС) в області за останні 10–15 років зросла завдяки спрощеним умовам для інвесторів і пільговому "зеленому" тарифу. Водночас експлуатація таких об'єктів нерідко супроводжується соціально-екологічними конфліктами через ігнорування принципів природоохоронного проєктування. Аналіз функціонуючих ГЕС вказує на наявність типових екологічних недоліків: відсутність рибоходів та фільтрів, деградація заплав і прибережних екосистем, порушення гідрологічного режиму річок, локальні підтоплення вгору за течією та різке зниження водності в нижньому б'єфі, особливо в періоди літньої межени [1; 3]. Такі прояви свідчать про необхідність зміни підходів до проєктування, будівництва та експлуатації малих ГЕС з урахуванням гідроекологічної специфіки Карпатського регіону. Рекомендовано переходити до концепції "екологічно адаптованої

гідроенергетики", яка включає моніторинг, мінімізацію впливу на біоту та обов'язкову реконструкцію існуючих об'єктів відповідно до європейських стандартів.

Оцінка потенціалу вітрової енергетики засвідчила, що перспективними залишаються гірські райони з висотами понад 800 м над рівнем моря, де середньорічна швидкість вітру стабільно перевищує 6 м/с. Найбільш придатними для розміщення вітротурбін є відкриті схили гірських пасом у Великоберезнянській, Рахівській та Воловецькій територіальних громадах. Проте на практиці реалізація таких проєктів супроводжується низкою викликів: опором з боку місцевих громад, побоюваннями щодо впливу на пейзаж, лісовий покрив, шумовим навантаженням і потенційною загрозою для птахів і кажанів, які мігрують через Карпатський біокоридор [8; 10]. Тому необхідним є удосконалення механізмів попередньої оцінки впливу, які мають включати не лише моделювання вітрових потоків, а й ландшафтно-візуальні аналізи, картування середовищ існування ключових видів і консультації з місцевим населенням. Запропоновано створити на рівні області геоінформаційну систему з потенційними зонами для вітрової генерації з урахуванням екологічних обмежень, що дозволить узгодити інтереси інвесторів, місцевих громад та органів охорони природи.

Стан розвитку сонячної енергетики в області демонструє позитивну динаміку, зокрема зростання кількості малих дахових СЕС та фермерських установок. Кліматичні умови, особливо в південних і південно-східних районах області (Мукачівська, Берегівська, Іршавська громади), дозволяють отримувати річну генерацію на рівні 1100–1250 кВт·год/м², що перевищує середньоукраїнські показники. Попри це, подальший розвиток стримується відсутністю єдиного бачення інтеграції СЕС у регіональну енергосистему, нестачею накопичувальних потужностей та проблемами утилізації фотоелементів після завершення терміну їх служби [4; 7]. Рекомендовано впроваджувати агрофотовольтаїку, тобто поєднання сільського господарства з розміщенням сонячних панелей, що дозволяє раціонально використовувати земельні ресурси та зберігати агроландшафти. Крім того, потрібне запровадження систем обліку життєвого циклу обладнання для запобігання екологічним наслідкам накопичення відходів СЕС.

Біоенергетика на Закарпатті розвивається переважно у вигляді невеликих приватних та комунальних ініціатив – котелень на трісці, пеле-

тах, біогазових установок. Основна сировина – це лісозаготівельні рештки, солома, гній, а також органічні відходи харчової промисловості. Аналіз показав, що при наявному обсязі біомаси область має потенціал покриття щонайменше 12–15% своїх потреб у тепловій енергії [9]. Водночас відсутність централізованої системи збору, транспортування та зберігання біомаси, низький рівень кооперації між лісгоспами, агропідприємствами та органами місцевого самоврядування призводить до втрати частини ресурсної бази. Крім того, існують екологічні ризики – дегуміфікація ґрунтів через надмірне вилучення залишків після жнив, потенційне забруднення при неякісному зберіганні сировини, викиди при згорянні низькоякісного палива. Тому пропонується створення регіональних кластерів біоенергетики, які включають екологічно безпечні технології переробки, стандарти логістики й критерії сталості.

З урахуванням виявлених екологічних і організаційних проблем обґрунтовано необхідність впровадження на рівні області комплексу системних заходів. Доцільним є запровадження обов'язкових стратегічних екологічних оцінок для всіх проєктів ВДЕ незалежно від типу й масштабу, розробка карт екологічної чутливості для визначення прийнятних зон розміщення енергетичних об'єктів, посилення контролю за дотриманням екологічних вимог на етапі проєктування та будівництва. Окремо наголошено на необхідності залучення громад до процесу оцінювання – через громадські слухання, електронні консультації та створення незалежних спостережних рад. Розбудова екологічно орієнтованої енергетики на Закарпатті має базуватись на принципах інтегровано

ваного підходу, що поєднує екологічну безпеку, економічну ефективність та соціальну підтримку.

Висновки. Розвиток відновлюваних джерел енергії в Закарпатській області має значний природно-ресурсний та економічний потенціал, що підтверджується аналізом сучасного стану та умов регіону. Використання малих гідроелектростанцій, вітрових та сонячних електростанцій, а також біоенергетики сприяє зменшенню викидів парникових газів, підвищенню рівня енергетичної незалежності та наближає регіон до досягнення цілей сталого розвитку.

Разом із тим, результати дослідження показали, що реалізація проєктів у сфері ВДЕ супроводжується низкою екологічних ризиків. Серед основних загроз визначено зміну гідрологічних режимів річок, негативний вплив на біорізноманіття, шумове та візуальне навантаження на ландшафти, а також проблеми утилізації відходів енергетичних установок.

Встановлено, що ключовою умовою ефективного й екологічно безпечного розвитку відновлюваної енергетики на Закарпатті є впровадження комплексного підходу, який передбачає обов'язкове проведення стратегічних екологічних оцінок, картування екологічно чутливих територій, удосконалення законодавчих вимог щодо відновлення природних систем після будівництва об'єктів, а також активне залучення громадськості до моніторингу реалізації проєктів.

Застосування запропонованих підходів дозволить максимально реалізувати потенціал ВДЕ регіону, зберігаючи при цьому природне середовище й забезпечуючи баланс між економічними інтересами та екологічною безпекою.

Список літератури:

1. Поп С. С., Шароді І. С. Освоєння відновлюваних енергетичних ресурсів Закарпатської області. *Український географічний журнал*. 2022. № 3. С. 30–38.
2. Павлик А. В. Еколого-економічні наслідки використання відновлюваних джерел енергії. Ужгород: Ужгородський національний університет, 2017. 27 с.
3. Багнюк В. М., Дідух Я. П. Екологічні проблеми Закарпаття. *Наукові записки НаУКМА. Біологія та екологія*. 2002. Том 20. С. 61–67.
4. Arkhypova N. V., Hrek O. I., Korzhov M. O. Renewable energy resources in the system of sustainable development of Carpathian region of Ukraine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1840. Article 1781.
5. Mishchenko M., Lytvynenko O., Ivanov V. Green Energy in Ukraine: State, Public Demands, and Trends. *Energies*. 2021. Vol. 14, Issue 22. Article 7745.
6. Petlenko, Y. (2024). Financing Green Energy for Enhancing Energy Security in Ukraine. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*. Vol. 2(55), P. 161–179.
7. Ali S., Khan R., Chen W. Eco-environmental, and social impacts of producing electricity with renewable sources. *Energy*. 2025. Vol. 278. Article 129876.
8. Гаднадь І., Тар К., Молнар Й. Сучасний стан та перспективи розвитку вітрової енергетики у світі, Європі та в Україні, зокрема на Закарпатті. *Український географічний журнал*. 2020. № 1 (109). С. 59–70.
9. Інститут технічної теплофізики НАН України. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / під ред. Г. Гелетути. Київ: Академперіодика, 2022. 373 с.

10. Поп С.С. Перспективи розвитку вітрової енергетики на території Закарпатської області. Мат. наук.-практ. конф. «Надрокористування в Україні. Інвестиційний аналіз. Трускавець, 2019. С. 297–300.

11. Легещича Д., Шароді Ю. В. Розвиток вітроенергетики України на прикладі Закарпатської області. Збірник наук. праць студентів геогр. факультету УжНУ. Ужгород, 2020. С. 63–68.

Serdenko T.V., Brodovich Yu.R., Kozar O.P., Maksyutova O.V. ECOLOGICAL ASPECTS OF RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT IN ZAKARPATTIA: POTENTIAL, CHALLENGES AND PROSPECTS

This article explores the ecological aspects of implementing renewable energy sources (RES) in Zakarpattia Oblast – one of Ukraine's most promising regions in terms of natural and climatic conditions. The study analyzes the geographic and resource-related preconditions for the development of sustainable energy sources, including small hydropower plants, wind and solar power stations, as well as biomass energy use. The authors emphasize that the integration of RES contributes to reducing greenhouse gas emissions, lowering environmental pressures, improving air quality, preserving biodiversity, and achieving climate goals. The development of green energy also creates additional opportunities for regional growth, energy decentralization, and investment attraction in mountainous and rural communities.

The study draws attention to several environmental risks associated with the implementation of RES projects. Key issues include disruption of river hydrology during the construction of small hydropower plants, ecosystem fragmentation, landscape transformation, acoustic and visual disturbances caused by wind turbines, and challenges related to the disposal of solar panels and other energy infrastructure. The research finds that without proper planning and environmental monitoring, even renewable technologies may produce significant adverse effects on natural systems. Therefore, the article substantiates a set of measures to mitigate environmental risks, such as the implementation of strategic environmental assessments, integration of ecological criteria into spatial planning, improvement of environmental legislation, and increased public participation in decision-making and monitoring processes.

The results presented in this study can be applied in the development of regional energy strategies, environmental programs, and the environmental justification of new energy projects in Zakarpattia. The proposed approaches are interdisciplinary in nature and may be of interest to specialists in the fields of ecology, energy, natural resource management, and sustainable development.

Key words: renewable energy sources, ecological aspects, environmental risks, Zakarpattia Oblast, small hydropower plants, wind power stations, sustainable development.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 12.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.235

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/21>**Ищенко К.С.**Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова
Національної академії наук України**Новіков Л.А.**Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова
Національної академії наук України**Коновал В.М.**

Черкаський державний технологічний університет

Пономаренко І.О.

Черкаський державний технологічний університет

Мазур О.М.

Приватне акціонерне товариство «Укragровибухпром»

Демченко О.В.

Черкаський державний технологічний університет

АНАЛІТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ДІЇ ВИБУХУ В МАСИВІ КРИСТАЛІЧНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД

У роботі розглянуто аналітичні і експериментальні дослідження впливу конструкцій зарядів вибухової речовини різної форми поперечного перерізу при дії вибуху в масиві кристалічних гірських порід складної будови по діаметру середнього куску. Було проведено експериментальні дослідження в лабораторних та полігонних умовах кар'єрів по встановленню характеру руйнування зразків граніту вибухом зарядів різної форми поперечного перерізу, розробці математичної моделі розрахунку по обґрунтуванню виходу фракцій дроблення за діаметром середнього куску згідно закону Розіна – Раммлера. Встановлено, що при вибуховому руйнуванні гранітних моделей рівномірність дроблення забезпечується використанням зарядів різної форми перерізу, а саме: змінного перерізу по колонці заряду та у вигляді квадратної призми. Проведені дослідження в промислових умовах кар'єру ТОВ «Уманський гранітний кар'єр» по оцінці розподілу гранулометричного складу зруйнованої гірничої маси після масового вибуху з використанням зарядів різної форми перерізу шляхом сегментації зображень фрагментів зразків порід з використанням моделі U-CARFnet і U-Net. Проведена порівняльна оцінка запропонованої моделі з традиційними методами сегментації зображень, емпіричним шляхом виведена формула для розрахунку діаметра середнього куску, яка враховує всі фактори при яких руйнується гірська порода, що підтверджує велику збіжність закону Розіна – Раммлера. Якість відбитої вибухом породи на уступі кар'єру оцінювали по діаметру середнього куску з використанням методів U-CARFnet та WipFrag, які обробляли за допомогою комп'ютерної програми. Використання коригованих параметрів буропідривних робіт з використанням комбінованих конструкцій зарядів вибухової речовини різної форми поперечного перерізу дозволило зменшити діаметр середнього куска відбитої гірської маси та знизити витрати вибухової речовини. При цьому вихід кондиційного куска збільшився, що забезпечило рівномірність дроблення відбитої гірської маси.

Ключові слова: тверде середовище, зарядна порожнина, вибухова речовина, вибухове руйнування, хвиля напружень.

© Іщенко К.С., Новіков Л.А., Коновал В.М.,
Пономаренко І.О., Мазур О.М., Демченко О.В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Збільшення вимог до інфраструктурних об'єктів в урбанізованих агломераціях великих міст являє собою будівництво високоякісних автомагістралей, пасажирських та вантажних перевезень залізницями, міського метрополітену, які швидко розширюються та будуються, можуть бути реалізовані застосуванням сучасної буропідривної технології. Вона стала поширеним методом при будівництві таких об'єктів завдяки відпрацьованій технології, простоті освоєння та низькій вартості. Однак, якщо при підготовці буропідривних робіт не будуть враховані і точно проаналізовані геологічні умови масиву гірських порід, це може призвести до неякісних результатів вибухових робіт, до нерівних контурів уступу кар'єру, підготовчої виробки (тунелю), формуванню заколів і навісів та нерівномірності дроблення гірських порід. Якість відбитої гірничої маси, а саме – діаметр середнього куску – є найбільш поширеним показником ефективності вибухових робіт, що може значно вплинути на продуктивність роботи транспортного обладнання (екскаватора) при її екскавації та безпеці гірничих робіт. Тому швидка та точна оцінка якості вибуху має вирішальне значення для подальшої розробки плану ведення гірничих робіт, обґрунтування параметрів буропідривних робіт, вибору сучасного обладнання та порядок виконання технологічних процесів. Ефективність буроподривної технології оцінюється за первинними показниками, таким як безпека, якість та економічні переваги в процесі підривання і вторинними показниками, таким як розмір відбитої гірничої маси. А через те, що при оцінці якості відбитої гірської маси в даний час використовуються сучасні цифрові фото відеокамери з високою роздільною здатністю отриманих знімків розвалу відбитої вибухом гірської маси, сучасних аналітичних методів щодо обґрунтування виходу середнього куску відбитої вибухом гірської маси є актуальним науково-прикладним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рациональний розподіл фрагментів вибуху за розмірами та відсотковий вміст відбитої гірничої маси є найважливішими показниками при оцінюванні ефективності вибухових робіт на кар'єрах. Точність статистичного аналізу фрагментів відбитої гірничої маси життєво важлива для гірничодобувного виробництва та проектування вибухових робіт. В даний час на більшості кар'єрів розмір фрагментів відбитої гірничої маси визначається шляхом ручного виміру з оцінкою їх неозброєним оком. Через висоту уступу куски породи, що утво-

рюються при масовому вибуху, можуть покрити велику площу. Ручна оцінка розподілу фрагментів відбитої гірської маси вибухом трудомістка, неефективна і неточна. Однак за тривалих вимірів фрагментів відбитої гірської маси вибухом існують серйозні потенційні загрози безпеці.

В результаті швидкого розвитку комп'ютерного програмного забезпечення в сучасних технологіях обробки експериментальних даних – технологіях обробки зображень, досягла значних успіхів і в даний час широко застосовується, як в гірничій справі [1], так і в різних галузях, з використанням порогової сегментації зображень відбитої гірської маси [2]. Також використано інші модифіковані методи [3, 4]. В результаті точну інформацію про зображення неможливо отримати з використанням згаданих підходів до обробки зображень, тому важко надати точні дані для подальшого розпізнавання зображень. У роботі [5] вперше запропоновано мережу U-Net зі структурою кодер-декодер з невеликою кількістю осередків. Цю технологію успішно використовували у суміжних галузях знань [6-8]. У роботі [9] запропоновано метод сегментації гірської породи з використанням кумулятивних кривих розподілу гранулометричного складу та застосували його для позиціонування та розпізнавання фрагментів гірської породи у кількох варіантах. Тим часом традиційна модель, розроблена на основі запропонованого методу перетворення U-Net враховує невраховані втрати отриманої інформації під час сегментації зображень відбитої вибухом гірської породи. У роботі [10] запропоновано модель RDU-Net для визначення розміру фрагментів відбитої вибухом гірської породи під час транспортування її на конвеєрній стрічці. Інші підходи щодо фрагментації (класифікації) відбитої вибухом гірської породи запропоновано у роботах [11-13], де наведено моделювання процесів грохочення з подвійним віброударним збудженням для поділу по крупності мінеральної сировини, яка важко класифікується. Застосування запропонованого методу дозволило знизити граничну крупність переробленої зволоженої сировини до 0,05-0,1 мм. Дослідженнями доведено, що в оцінці сегментації зображень розвалу гірської породи запропонована модель DUNet перевершувала за ефективністю модель U-Net. У роботі [14] розроблено швидкокодуюча мережа U-Net, що дозволяє виконувати дослідження по виявленню та сегментації зелених котунів залізної руди на зображеннях. Для оцінки гранулометричного складу руди запропонували модель VGG16 [15]. Робота [16] присвячена сег-

ментації родовищ залізної руди з використанням зображень високого рівня, які отримані шляхом дистанційного зондування на основі Res-U-Net. У роботі [17] представлена модель U-Net для розширеного дослідження (точності) сегментації зображень. Покращена модель U-Net для сегментації зображень кусків гірської породи з VGG-16 в якості кодера наведена у роботі [18]. У роботі [19] запропоновано ефективна модель сегментації, яка заснована на адгезії та перекритті простору між кусками гірської породи на відвалі. Дослідження також було розширено за рахунок включення семантичної сегментації зображень під час дослідження шліфів під мікроскопом. У роботі [20] наведено результати досліджень щодо семантичної сегментації прозорих та непрозорих мінералів з епоксидної смоли на мікрофотографіях шліфів у відбитому світлі з використанням моделі DeepLabv3+. У роботі [21] проведено аналіз розподілу частинок за розмірами фрагментованої породи на основі сегментації супер піксельного зображення. У роботі [22] здійснено порівняння продуктивності двох типів алгоритмів сегментації: Mask R-CNN і SOLO v2. Це дозволяє подолати обмеження на тонких зрізах шліфів, отже, прискорити ідентифікацію межі між зернами з наступною класифікацією мінералів. Багато досліджень з оцінки якості відбійки гірських порід у промислових умовах були проведені вченими за допомогою аналізу розпізнавання зображень. Крім того, було розроблено систему взаємодії людини та комп'ютера для підвищення точності розпізнавання, прискорення швидкості розпізнавання та досягнення калібрування в реальному часі [23-26] та фотограмметричну систему, засновану на зіставленні зображень фрагментації відбитої гірської маси [27-28]. Більшість існуючих методів використовувалися для отримання розподілу фрагментації тріщинуватої породи шляхом отримання характеристик структури зображення. Дослідники в основному використовували моделі Гаусової мережі [29], коефіцієнти перетворення Фур'є, локальні бінарні моди та фільтри Габора [30] для отримання даних про розподіл розмірів фрагментації тріщинуватих порід. У роботі [31] наведено модель нейронної мережі на основі комп'ютерного моделювання сегментації та обробки тріщинуватої породи. Численні дослідники намагалися вирішити вищезгадані проблеми з допомогою різних алгоритмів. У роботі [32] використовується алгоритм ACE + CLANE для обробки зображень розміру відбитих вибухів гірських порід у тунелях. У роботі [33] використо-

вується кластерний аналіз методів комп'ютерного моделювання для сегментації обробки зображень пористих середовищ. У роботі [34] запропоновано метод бінаризації Phansalkar і метод маркування вихідних точок водорозділу. Останній метод дозволяє точно визначати розмір кусків гірських порід. Обмежуючим фактором у методах вимірювання кусків гірських порід є їх швидкість, оскільки повільніші процеси вимірювання можуть вплинути на загальну роботу гірничодобувних підприємств [35]. Розробка програмного забезпечення для аналізу результатів вибухових робіт дозволяє оцінювати ефективність вибуху на основі ключових показників, таких, як гістограма блоковості гірських порід, що відбиваються вибухом, кумулятивна крива розподілу гранулометричного складу, а також аналітичні методи по обґрунтуванню діаметру середнього куску, такий як закон Розіна – Раммлера. Це дозволяє швидко виявляти та ідентифікувати зруйновану вибухом гірничу масу, забезпечуючи технічну підтримку для оптимізації параметрів вибухових робіт. З рештою, цей підхід спрямований на зниження витрат на будівництво та підвищення ефективності вибухових робіт у вирішенні інженерних завдань. Комплексний підхід по сегментації зображень може вирішити труднощі з отриманням інформації про фрагментацію гірничої маси, відбитої вибухом у кар'єрах та забезпечити їх ефективність для прогнозування розподілу (фрагментації) гранулометричного складу гірничої маси відбитої вибухом для обґрунтування (оптимізації) раціональних параметрів вибухових робіт. Одним із недоліків робіт, присвячених обґрунтуванню раціональних параметрів буропідричних робіт по оцінці якості руйнування масиву кристалічних гірських порід є не врахування структури порід, її тріщинуватість і напрямок розповсюдження в масиві які впливають на характер розподілу гранулометричного складу та його фрагментацію на уступі при руйнуванні їх вибухом. Тому в нашій роботі перевага надається експериментальним дослідженням з підкріпленням їх результатами чисельних розрахунків.

Невирішена раніше частина проблеми. В даний час не існує універсального комплексного підходу (теоретичний та експериментальний), який включає: вибір конструкції заряду і типу вибухової речовини; ініціювання зарядів вибухової речовини з урахуванням характеристик масиву порід, що руйнуються, з подальшим отриманням інформації про фрагментацію гірничої маси шляхом сегментації зображень розвалу

гірничої маси на уступі кар'єру. Врахування цих факторів може вирішити труднощі для прогнозування розподілу (фрагментації) гранулометричного складу гірничої маси відбитої вибухом для обґрунтування (оптимізації) раціональних параметрів вибухових робіт.

Робота виконується відповідно до комплексної програми Національної академії наук України з розробки безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом «Наукове обґрунтування розвитку безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом зі зменшенням їх шкідливого впливу на навколишнє середовище» (№ ДР 0120U101113)

Метою статті є аналітичні і експериментальні дослідження впливу конструкцій зарядів вибухової речовини різної форми поперечного перерізу при дії вибуху в масиві кристалічних гірських порід складної будови для обґрунтування розподілу (фрагментації) гранулометричного складу гірничої маси по діаметру середнього куску.

Наведені у роботі результати досліджень виконано з використанням методів фізичного моделювання вибухового руйнування гірських порід в лабораторних та промислових умовах. Оцінку якості гранулометричного складу гірничої маси виконано шляхом сегментації зображень фрагментів зразків порід з використанням моделі U-CARFnet і U-Net, а по діаметру середнього куску – методами U-CARFnet та WipFrag з обробкою зображень за допомогою комп'ютерної програми та закону Розіна – Раммлера. Результати обробки даних гранулометричного складу представляють у вигляді кривої розподілу, гістограми і даних гранулометричного складу по класам.

Розробка моделі аналітичного обґрунтування гранулометричного розподілу підірваної вибухом кристалічної гірської породи складної будови з використанням закону Розіна – Раммлера, отримання формули для розрахунку середнього діаметра відбитої гірничої маси та обґрунтування в промислових умовах раціональних параметрів комбінованих зарядів ВР різної форми поперечного перерізу.

Виклад основного матеріалу. Теоретична частина. Для аналітичного обґрунтування гранулометричного розподілу підірваної вибухом кристалічної гірської породи складної будови була запропонована формула згідно закону Розіна – Раммлера [36].

$$R = \frac{V(x)}{V_0} = \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right], \quad (1)$$

де V – загальний об'єм відбитої гірничої маси, m^3 ; $V(x)$ – об'єм усіх фракцій, лінійний розмір яких більше x , x_0 , m^3 ; n – параметр розподілу.

З урахуванням (1) функція розподілу (сумарний відносний об'єм фракцій, довжина яких не перевищує x) має вигляд

$$\Phi(x) = 1 - R(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right]. \quad (2)$$

Вірогідність того, що розмір фракцій лежить у діапазоні $(x, x+dx)$ тоді можна розрахувати за формулою

$$dp = \Phi'(x)dx = \frac{n}{x_0} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{n-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right]. \quad (3)$$

Тоді кількість кусків в цьому діапазоні визначається за формулою

$$dm = \frac{V_0}{m} dp, \quad (4)$$

де V_0 – середній об'єм куску, який має розміри в діапазоні $(x, x+dx)$, m^3 .

Ввівши таким чином поняття вірогідності співпадає з загальноприйнятим в гірничій справі визначення розподілу гранулометричного складу, а саме

$$dp = \frac{Vdm}{V_0} = \frac{dV}{V_0},$$

або в кінцевих величинах

$$\Delta p_i = \frac{\Delta V_i}{V_0}, \quad (5)$$

де ΔV_i – об'єм фракції, m^3 .

Таким чином, вірогідність того, що кусок має розмір, який лежить в діапазоні від x_i до $x_i + \Delta x_i$, тобто це відносний склад даної фракції. Тоді середній діаметр куску в експериментах можна визначити таким чином

$$\langle x \rangle = \sum_{i=1}^k x_i \frac{\Delta V_i}{V_0}, \quad (6)$$

де k – число груп фракцій.

В нашому випадку маємо

$$\langle x \rangle = \int_0^{\infty} x dp. \quad (7)$$

Тоді підставляючи в формулу (7) рівняння (3) і проводячи інтегрування, отримаємо

$$\langle x \rangle = x_0 \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right), \quad (8)$$

де $\Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\frac{1}{n}} dt$ – гама функція

Тоді дисперсія величини x має вигляд

$$D = \int_0^{\infty} (x - \langle x \rangle)^2 dp = \langle x \rangle^2 \left[\frac{1 + \frac{2}{n}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right)} - 1 \right]. \quad (9)$$

З формули (9) випливає, що $n > 1$. Тоді для показника, що характеризує середній діаметр, можна записати

$$d_{cp} \approx \frac{x_0^2}{n}. \quad (10)$$

Припустимо, що отримані після вибуху куски породи з характерним розміром геометрично однакові. Тоді для площі поверхні та об'єму кусків можна записати:

$$S = K_s x^2;$$

$$V = K_v x^3,$$

де K_s, K_v – постійні коефіцієнти.

Загальну поверхню всіх кусків можна розрахувати за формулою

$$S = \int_0^{\infty} S dm = V_0 \frac{K_s}{K_v} \int_0^{\infty} \frac{dp}{x} = \frac{V_0}{x_0} \frac{K_s}{K_v} \Gamma\left(1 - \frac{1}{n}\right).$$

Очевидно, що теоретично розрахований оптимальний варіант дроблення є руйнування всього об'єму на однакові куски розміром $< x >$. Тоді поверхня всіх кусків визначається за формулою

$$\langle S \rangle = \frac{V_0}{\langle x \rangle} \frac{K_s}{K_v}.$$

Тоді відносну долю додатково створеної поверхні можна визначити за формулою

$$\frac{\Delta S}{\langle S \rangle} = \frac{S - \langle S \rangle}{\langle S \rangle} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{n}\right) \Gamma\left(1 - \frac{1}{n}\right) - 1. \quad (11)$$

Таким чином при $n = 1$ з формули (2) отримаємо класичний закон Пуассона. При $\Gamma(0) \rightarrow \infty$ в формулі (11) сумарна поверхня відбитих кусків породи нескінченно велика.

Експериментальна частина. Для підтвердження закону Розіна – Раммлера по обґрунтуванню діаметра середнього куска відбитої гірничої маси в ІГТМ НАН України разом з Черкаським державним технологічним університетом МОН України були проведено експериментальні дослідження процесу вибухового руйнування твердого середовища на моделях в лабораторних і полігонних умовах.

Для обґрунтування конструкцій зарядів вибухової речовини та їх параметрів з метою їх

подальшого використання в промислових умовах, обрано метод фізичного моделювання процесів руйнування твердого середовища на моделях. В якості моделюючого матеріалу обрана модель кубічної форми з розміром бокової грані рівному 150 мм. Моделі виготовляли із гранітних штуфів, відібраних у кар'єрі ТОВ «Уманський гранітний кар'єр» (Звірківське родовище гранітів, Черкаська область) в зоні без впливу вибухових робіт. Штуфи із яких виготовляли моделі представлені сірими і рожевими дрібнозернистими гранітами середньої тріщинуватості міцністю $f = 12-16$ балів за шкалою проф. М. М. Протод'яконова.

У підготовлених моделях в центрі однієї з граней свердлили зарядну порожнину довжиною 105 мм і діаметром від 6 до 8 мм, яка імітує шпур. В підготовлених зарядних порожнинах формували заряди різної форми поперечного перерізу (циліндричні, у вигляді трикутної та квадратної призми) (рис. 1).

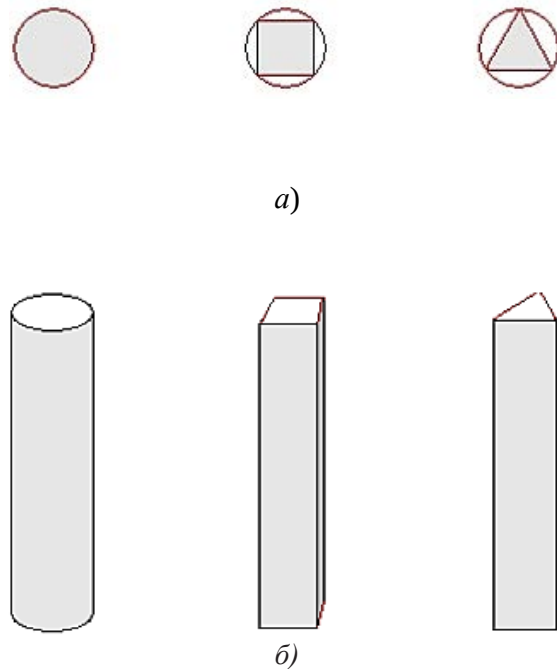


Рис. 1. Конструкції зарядів вибухової речовини з різною формою поперечного перерізу (а) та вид стовпа заряду (б)

У зарядну порожнину в якості вибухової речовини поміщали суміш тєну (80%) і твердого ракетного палива (20%) [37]. Маса заряду вибухової композиції складала 500 мг. Устя порожнини герметизували піщаною набивкою з розміром фракції 0.25 мм.

Гранітна модель встановлювалась у вибухову камеру, де проводився підрив заряду вибухової речовини з використанням електронного пристрою [38]. Далі зруйновані зразки моделі вийма-

лись із вибухової камери з подальшим їх розсіюванням на аналізаторі ситовому А30 зі стандартним набором сит. Отримані значення розподілу гранулометричного складу зруйнованих моделей передавались на ноутбук для їх подальшої обробки з використанням закону Розіна – Раммлера.

Особливий інтерес представляли дослідження в промислових умовах кар'єру ТОВ «Уманський гранітний кар'єр», де розташоване Звірківське родовище гранітів. В якості об'єкту досліджень обрано масиви міцних гірських порід складної будови при руйнуванні яких проведено обґрунтування конструкцій зарядів різної форми поперечного перерізу (рис. 1).

На основі геологічних досліджень оголених блоків гірських порід на уступі кар'єру було виявлено, що вони представлені сірими і рожевими дрібнозернистими гранітами середньої тріщинуватості міцністю $f = 12-16$ балів за шкалою проф. М. М. Протод'яконова. Рівень води у пробурених свердловинах досягає від 1,0 до 2,0 м при середній обводненості масиву 15-20%. Вибухові роботи у кар'єрі проводить ПрАТ «Укграгровибухпром».

Встановлення основних характеристик тріщинуватості гранітного масиву в межах гірничого відводу кар'єру (рис. 2) здійснювалось згідно методики і «Методичних рекомендацій по обґрунтуванню раціональних параметрів буропідричних робіт...» [39], які розроблені в ІГТМ НАН України спільно з Черкаським ДТУ. Була проведена стереофотозйомка оголених порід на горизонті, прийнятому для промислових випробувань раціональних параметрів буропідричних робіт розроблених способів вибухового руйнування гірських порід складної будови [40-43] (блок №1, гор. +108 м.) з наступним дешифруванням фотознімків поверхні уступу кар'єру.

Після обробки даних отримані усереднені параметри основних систем тріщин на кар'єрі (табл. 1).

Для оцінки впливу визначених основних параметрів систем тріщин на характер вибухового руй-

нування анізотропного масиву, вздовж лінії вибою були пробурені і підірвані шпури діаметром від 36 до 43 мм і глибиною від 1 до 1.5 м. В якості вибухової речовини використовували патронований Анемікс-70.

По визначених параметрах великої a і малої b осі воронки викиду, а також її орієнтації був розрахований коефіцієнт анізотропії $K = a/b$ згідно «Методичних рекомендацій по обґрунтуванню раціональних параметрів буропідричних робіт» [39]. Величина коефіцієнту склала 1.16. З урахуванням величини коефіцієнту K були скореговані параметри сітки свердловин на експериментальній ділянці блоку, яка склала 3.5×3.5 м.

Відповідно до змінених параметрів сітки свердловин, а також з урахуванням виявлених на одному з експериментальних блоків зон підвищеної тріщинуватості (орієнтованих ортогональної лінії вибою), в масиві на уступі блоку висотою 18 м бурили свердловини діаметром 110 мм і глибиною 16 м (згідно з паспортом буропідричних робіт). При цьому довжина свердловинного заряду становила 13 м, а довжина набивки склала 3 м.

Під час випробувань блоки, які підлягають руйнуванню ділилися на експериментальні та контрольні ділянки. На контрольних ділянках зарядження свердловин, пробурених по сітці 3×3 м, проводилося звичайним способом з формуванням свердловинних зарядів суцільної конструкції. На експериментальних ділянках зарядження свердловин здійснювалось за сіткою 3.5×3.5 м з формуванням комбінованих свердловинних зарядів змінного перерізу в зоні монолітних порід. На межі блоку з тильної його частини свердловинні заряди чергувалися між собою і мали форму трикутної та квадратної призм (рис. 4).

Послідовність зарядки свердловин на уступі блоку здійснюється у наступній послідовності [44].

Таблиця 1

Характеристика основних систем тріщин на кар'єрі ТОВ «Уманський гранітний кар'єр»

Найменування систем тріщин (номенклатура Клооса)	Коефіцієнт тріщинуватості	Відстань між стінками тріщин, мм	Відстань між окремими тріщинами, м	Ширина зони підвищеної тріщинуватості, м	Відстань між центрами зон, м
Поздовжні тріщини стискання – тріщини S	2÷4	0.012÷0.16	0.15÷2.9	50÷70	50÷76
Поперечні тріщини відриву – тріщини Q	2÷5	1.2÷4.5	1.3÷6.8	60÷80	65÷80
Горизонтальні тріщини розвантаження – тріщини L	4÷8	0.05÷0.15	0.5÷1.5	зони підвищеної тріщинуватості відсутні	–

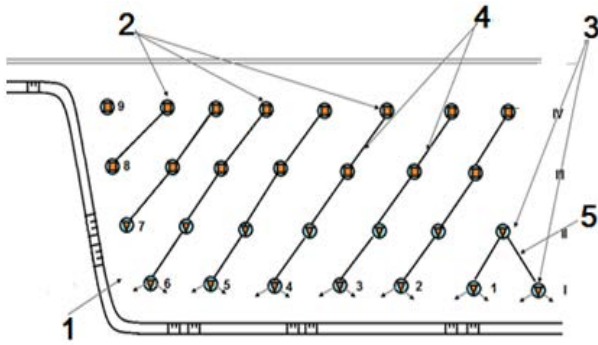


Рис. 2. Схема розміщення свердловин та комутація зарядів на уступі кар'єру ТОВ «Уманський гранітний кар'єр»: 1 – уступ; 2 – ряди свердловин с зарядами квадратної форми; 3 – ряди свердловин с зарядами трикутної форми; 4 – діагональна схема комутації; 5 – схема комутації врубових свердловин

Спочатку у свердловину встановлюють перший проміжний детонатор з тротилової шашкою Т-400Г. Далі в центральну частину свердловини, що залишилася, встановлюють секцію конверсійної ЕВР (Анемікс-70) типу ДКРП-4 з піроксиліновим порохом. У проміжок між поверхневою кромкою свердловини та зарядом подають наступну порцію ЕВР та встановлюють другий (верхній) детонатор Т-400Г. На завершальному етапі свердловину герметизують набивкою із бурового штабу. Потім у свердловинах, пробурених у тильній частині масиву уступу, на ділянці з протяжними зонами підвищеної тріщинуватості формують подовжені заряди у вигляді квадратної та трикутної призм. Профіль свердловинних зарядів виготовляють із щільного поліетилену. Зарядку свердловин проводять у такій послідовності, як і для зарядів зі змінним поперечним перерізом.

Ініціювання зарядів велося з використанням неелектричної системи НСІ "Імпульс", а внутрішні свердловинні уповільнення здійснювалися за допомогою спеціальних пристроїв – уповільнювачів. Пристрої з'єднувалися з головним патроном-бойовиком, що підриває, за допомогою хвилеводів неелектричної системи НСІ "Імпульс". Заряди на уступі блоку гірських порід були комутовані у групи, які з'єднані за діагональною схемою з використанням зустрічного ініціювання.

Після масового вибуху на ділянці уступу кар'єру було проведено фотозйомку фрагментів відбитої гірничої маси з фіксуванням кусків гірської породи з різних ділянок уступу (рис. 3).

В дослідженні набір зображень кусків породи виконано за допомогою мобільного телефону – Vivo X21.



Рис. 3. Зображення розвалу відбитої вибухом гірничої маси на різних ділянках уступу кар'єру

Для обробки зображень кусків породи була використана інтелектуальна система ідентифікації та аналізу ефективності вибухових робіт на уступі кар'єру з використанням моделі U-CARFnet [45]. Ця система заснована на покращеному алгоритмі Otsu та покращеному генетичному алгоритмі по фрагментації гірничої маси. Підготовлені зображення розвалу гірничої маси від вибухових робіт на уступі сегментуються з використанням маркерної сегментації генетичного алгоритму та запропонованого алгоритму з використанням методів U-CARFnet [46] та WipFrag [47]. Сегментизовані фрагменти розвалу гірничої маси оброблялися за допомогою комп'ютерної програми.

На рис. 4 наведено гістограму гранулометричного складу дрібнодисперсної фракції продуктів вибухового руйнування гранітних моделей зарядами різної форми перерізу.

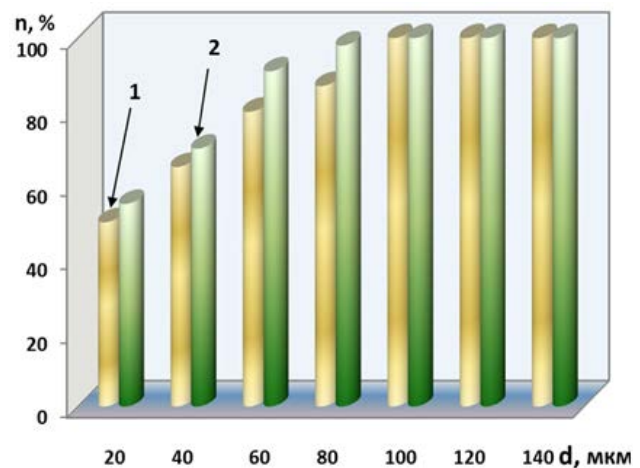


Рис. 4. Гістограма гранулометричного складу дрібнодисперсної фракції зруйнованих гранітних моделей (Звірівське родовище гранітів Черкаська область) зарядами вибухової речовини: 1 – заряд вибухової речовини з квадратної формою поперечного перерізу; 2 – заряд вибухової речовини з трикутною формою поперечного перерізу

Аналіз отриманих результатів (рис. 4) показує, що вихід найдрібніших фракцій в інтервалі від 0 до 100 мкм під впливом різних умов дина-

мічного навантаження та на контакті «вибухова речовина – гірська порода» змінюється за логарифмічною залежністю. В результаті обробки експериментальних даних було підтверджено велика збіжність закону Розіна-Раммлера при теоретичному розрахунку середнього діаметра куску, яка не перевищила 10-12%.

Також емпіричним шляхом було отримано формулу для розрахунку середнього діаметра куску відбитої гірничої маси, а саме:

$$\langle x \rangle = A \left(\frac{V_0}{Q} \right)^{4/5} Q^{1/6}. \quad (12)$$

де A – числовий параметр ($A = 7$ – для порід середньої міцності $f = 8-10$; $A = 10$ – для міцних сильно тріщинуватих порід міцністю $f = 10-14$; $A = 13$ – для надміцних слабо тріщинуватих порід міцністю $f = 12-16$); Q – маса заряду вибухової речовини в одній свердловині, кг.

Формула (12) враховує об'єм відбитої гірничої маси, тип і масу вибухової речовини в одній

свердловині, питомі втрати вибухової речовини і коефіцієнт міцності порід.

Питомі витрати вибухової речовини визначаються за формулою

$$q = QV_0^{-1}.$$

У табл. 2 представлені результати розрахунку середнього діаметра куску гірничої маси після проведення експериментальних вибухів на уступі кар'єру, де фрагменти розвалу порід пройшли сегментацію методами генетичного алгоритму U-CARFnet [45] та WipFrag [47].

На рис. 5 наведені результати обробки сегментованих фрагментів розвалу гірничої маси оброблені за допомогою комп'ютерної програми.

Аналіз отриманих результатів (рис. 5) показує, що застосування змінених параметрів буропідричних робіт з використанням комбінованих конструкцій зарядів зі змінним поперечним перерізом призводить зменшення до 15% середнього діаметра куску відбитої гірської маси, а також до зниження на 10 ÷ 15% витрат про-

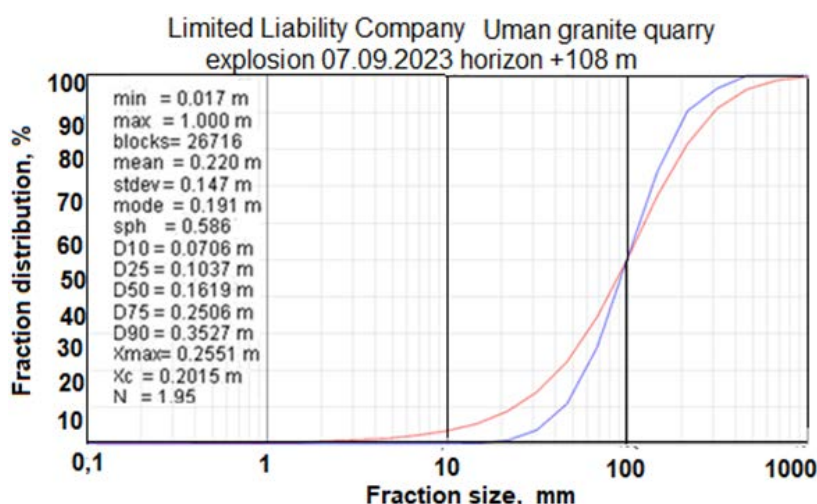


Рис. 5. Характер розподілу гранулометричного складу відбитої гірничої маси на уступі кар'єру

Таблиця 2

Розрахунки середнього діаметра куску гірничої маси

Дослідна діляниця				Контрольна діляниця			
Класи крупності, mm	Середній розмір куска по класу, d_i , mm	Вихід фракцій, W_i , mm	$d_i W_i$	Класи крупності, mm	Середній розмір куска по класу, d_i , mm	Вихід фракцій, W_i , mm	$d_i W_i$
0 ÷ 200	100	40	4000	0 ÷ 200	100	25.7	2570
201 ÷ 400	300	30	9000	201 ÷ 400	300	23.5	7050
401 ÷ 600	500	15,3	7650	401 ÷ 600	500	22.6	11300
> 600	700	5,7	3900	> 600	700	26.2	15820
Сумарне значення		24640		Сумарне значення		36740	
$d_{cp} = \Sigma d_i W_i / 100 = 246.4 \text{ mm}$				$d_{cp} = \Sigma d_i W_i / 100 = 367.4 \text{ mm}$			

мислових ВР. При цьому вихід кондиційного куска із середнім діаметром $201 \div 600$ мм збільшується на 10%.

У результаті промислових випробувань запропонованої технології ведення вибухових робіт на кар'єрі ТОВ «Уманський гранітний кар'єр» вихід гірничої маси з 1 м свердловини становив $8,4 \text{ м}^3$, а обсяг бурових робіт – $2260,5 \text{ м}^3$.

Висновки. Проведені дослідження дозволяють сформулювати наступні висновки:

1. Експериментально встановлено, що при руйнуванні гранітних моделей зарядами різної форми перерізу вихід найдрібніших фракцій в інтервалі від 0 до 100 мкм під впливом різних умов динамічного навантаження та на контакті «вибухова речовина-гірська порода» змінюється за логарифмічною залежністю.

2. Оцінка ефективності буропідричних робіт і зниження часу обробки та сегментації зображень фрагментів зразків порід з подальшим коригуванням параметрів буропідричних робіт для конкретних умов кар'єру використано моделі U-CARFnet і U-Net.

3. Застосування змінених параметрів буропідричних робіт з використанням комбінованих конструкцій зарядів вибухової речовини різної форми зі змінним поперечним перерізом призводить до зменшення на 30% середнього діаметра

куска відбитої гірської маси та зниженню витрати вибухової речовини на $10 \div 15\%$. При цьому вихід кондиційного куска збільшується на 10%.

4. Підвищення ефективності дроблення гірничої маси досягається за рахунок коригування основних параметрів буропідричних робіт, застосування нових конструкцій комбінованих свердловинних зарядів з різною формою поперечного перерізу, обліку напрямку та інтенсивності систем тріщин різної морфології в блоці, що руйнується. Це дає можливість при постійній масі заряду вибухової речовини збільшити його довжину і рівномірно розподілити вибухову речовину по висоті уступу.

5. Впровадження запропонованої технології ведення вибухових робіт на кар'єрах при відбійці гірських масивів зі складною структурою дозволяє забезпечити ефективне та якісне дроблення гірських порід. При цьому економія вибухової речовини на одній свердловині становить до 30 kg, а матеріальні витрати на масовий вибух знижуються на понад 30000 грн. Це дозволяє знизити питому витрату вибухової речовини в середньому на 15%, зберегти проектну позначку підосви уступу та підвищити техніко-економічні показники роботи гірничо-видобувних підприємств.

Список літератури:

1. Wang R., Zhang W., Shao L. Research of ore particle size detection based on image processing. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2018. № 460. P. 505–514. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6499-9_48. (дата звернення: 19.08.2025).
2. Lu Z. M., Zhu F. C., Gao X. Y., et al. In-situ particle segmentation approach based on average background modeling and graph-cut for the monitoring of L-glutamic acid crystallization. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* (July 2017). 2018. №178. P. 11–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2018.04.009>. (дата звернення: 19.08.2025).
3. Dong K., Jiang D. Automated estimation of ore size distributions based on machine vision. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2014. №238 LNEE. P. 1125–1131. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4981-2_122. (дата звернення: 19.08.2025).
4. Chalfoun J., Majurski M., Dima A., et al. Fogbank: A single cell segmentation across multiple cell lines and image modalities. *BMC Bioinformatics*. 2014. №15(1). P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1186/1471-2108-15-1>. (дата звернення: 19.08.2025).
5. Navab N., Hornegger J., Wells W. M., Frangi A. F. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015. *Part III. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: 18th International Conference Munich, Germany. (Munich, October 5–9, 2015 proceedings). Munich, 2015. №9351(Cvd). P. 12–20. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4>. (дата звернення: 19.08.2025).
6. Raza S. E. A., Cheung L., Epstein D., et al. MIMO-Net: A multi-input multi-output convolutional neural network for cell segmentation in fluorescence microscopy images. *On Biomedical Imaging – 2017: Proceedings International Symposium. Znanstvena misel journal*. 2025. №98(64). P. 337–340. URL: <https://doi.org/10.1109/ISBI.2017.7950532>. (дата звернення: 19.08.2025).
7. Oktay O., Schlemper J., Folgoc L. Le, et al. Attention U-Net: Learning Where to Look for the Pancreas. *Middle*. 2018. URL: <http://arxiv.org/abs/1804.03999> (дата звернення: 19.08.2025).
8. Sevastopolsky A., Drapak S., Kiselev K., et al. Stack-U-Net: Refinement Network for Image Segmentation on the Example of Optic Disc and Cup. 2018. URL: <http://arxiv.org/abs/1804.03998> (дата звернення: 19.08.2025).

9. Zhan Y., Zhang G. An improved OTSU algorithm using histogram accumulation moment for ore segmentation. *Symmetry*. 2019. №11(3). URL: <https://doi.org/10.3390/sym11030431>. (дата звернення:19.08.2025).
10. Xiao D., Liu X., Le B. T., et al. An ore image segmentation method based on rdu-net model. *Sensors (Switzerland)*. 2020. №20 (17). P.1–16. URL: [pmid:32887432](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32887432/). (дата звернення:19.08.2025).
11. Шевченко О.І. Розробка наукових основ процесу віброударного зневоднення техногенної сировини різного гранулометричного складу: автореф. дис.... докт. техн. наук: спец. 05.15.09 «Геотехнічна та гірнична механіка»; Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. Дніпро, 2021. 43 с.
12. Lapshin E.S., Shevchenko A.I. Ways of improvement of vibrational segregation and dehydration of mineral raw materials. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2013. No 3. P. 45–51. URL: <http://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/784-2013/contentsno-3-2013/solid-state-physics-mineral-processing/2190-ways-of-improvement-of-vibrational-segregation-anddehydration-of-mineral-raw-materials>. (дата звернення:19.08.2025).
13. Lapshyn Y., Shevchenko O. Prospects for using screens with double vibration-impact excitation for size separation and dewatering of wet mineral raw materials that are difficult to classify. *Essays of Mining Science and Practice: materially VI International Conference (RMGET 2024) 2025 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1348 012074. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012074>, available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1348/1/012074/pdf>. (дата звернення:19.08.2025).
14. Duan J., Liu X., Wu X., Mao C. Detection and segmentation of iron ore green pellets in images using lightweight U-net deep learning network. *Neural Computing and Applications*. 2020. № 32(10). P. 5775–5790. URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04045-8>. (дата звернення:19.08.2025).
15. Olivier L. E., Maritz M. G., Craig I. K. Estimating ore particle size distribution using a deep convolutional neural network. *IFAC Papers On Line*. 2020. № 53(2). P.12038–12043. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.740>. (дата звернення:11.08.2025).
16. Mustafa N., Zhao J., Liu Z., et al. Iron ORE Region Segmentation Using High-Resolution Remote Sensing Images Based on Res-U-Net. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2020. P. 2563–2566. URL: <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9324218>. (дата звернення:11.08.2025).
17. Liu X., Zhang Y., Jing H., et al. Ore image segmentation method using U-Net and Res_Unet convolutional networks. *RSC Advances*. 2020. № 10(16). P. 9396–9406. URL: [pmid:35497237](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35497237/). (дата звернення:11.08.2025).
18. Yang H., Huang C., Wang L., Luo X. An Improved Encoder-Decoder Network for Ore Image Segmentation. *IEEE Sensors Journal*. 2021. № 21(10). P. 11469–11475. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3016458>. (дата звернення:11.08.2025).
19. Liu Y., Zhang Z., Liu X., et al. Efficient image segmentation based on deep learning for mineral image classification. *Advanced Powder Technology*. 2021. № 32(10). P. 3885–3903. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.08.038>. (дата звернення:11.08.2025).
20. Filippo M. P., da Fonseca Martins Gomes, O., da Costa, et al. Deep learning semantic segmentation of opaque and non-opaque minerals from epoxy resin in reflected light microscopy images. *Minerals Engineering*. 2021. № 170(June). URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107007>. (дата звернення:11.08.2025).
21. Yang Z., Ding H., Guo L., Lian M. Superpixel Image Segmentation-Based Particle Size Distribution Analysis of Fragmented Rock. *The Multidisciplinary Open Access Journal*. 2021. № 9. P. 59048–59058. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072998>. (дата звернення:11.08.2025).
22. Koh E. J. Y., Amini E., McLachlan G. J., Beaton N. Utilising convolutional neural networks to perform fast automated modal mineralogy analysis for thin-section optical microscopy. *Minerals Engineering*. 2021. № 173 (September), 107230. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107230>. (дата звернення:11.08.2025).
23. Lei M. et al. A novel tunnel-lining crack recognition system based on digital image technology. *Tunnell. Undergr. Space Technol.* 2021. № 108. P. 103724. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103724>. (дата звернення:11.08.2025).
24. Wang P., Wang S., Jierula A. Automatic identification and location of tunnel lining cracks. *Advances in Civil Engineering*. 2021. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/8846442>. (дата звернення:11.08.2025).
25. Yan X., Zhou G., Zhao X. Method for rapid detection and treatment of cracks in tunnel lining based on deep learning. *On Health Monitoring of Structural and Biological Systems: Proc. IX International Conference Electr Network*. 2020. Vol. 11381. P. 331–339. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2558472>. (дата звернення:11.08.2025).
26. Huang H.-W., Li Q.-T., Zhang D.-M. Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel. *Tunnel. Undergr. Space Technol.* 2018. № 77. P. 166–176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.002>. (дата звернення:11.08.2025).
27. Huang Y., Liu F., Wang J., et al. A photogrammetric system for tunnel underbreak and overbreak detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. №23. P. 22217–22226. URL: <https://doi.org/10.1109/tits.2022.3157588>. (дата звернення:11.08.2025).

28. Kemeny J. M. et al. Analysis of rock fragmentation using digital image processing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1993. № 119 (7). P. 1144–1160. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:7\(1144\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:7(1144)). (дата звернення: 11.08.2025).
29. Singh B. K. et al. Application of digital image analysis for monitoring the behavior of factors that control the rock fragmentation in opencast bench blasting: A case study conducted over four open cast coal mines of the Talcher Coalfields, India. *Znanstvena misel journal*. 2025. №98 (65). *Journal of Sustainable Mining*. 2019. № 18 (4). P. 247–256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.08.003>. (дата звернення: 11.08.2025).
30. Yaghoobi H. et al. Determining the fragmented rock size distribution using textural feature extraction of images. *Powder Technol.* 2019. №342. P.630–641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.006>. (дата звернення: 11.08.2025).
31. Hamzeloo E., Massinaei M., Mehrshad N. Estimation of particle size distribution on an industrial conveyor belt using image analysis and neural networks. *Powder Technol.* 2014. №261. P. 185–190. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.038>. (дата звернення: 11.08.2025).
32. Li X. Y., Huang C. A novel method for image segmentation based on improved OTSU and improved genetic algorithm. *Hands-On Renewable Energy Experiments – Res Lab*. 2012. №31(12). P. 57–61. URL: (дата звернення: 11.08.2025).
33. Purswani P. et al. Evaluation of image segmentation techniques for image-based rock property estimation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. № 195. P.107890. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107890>. (дата звернення: 11.08.2025).
34. Guo Q. et al. A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm. *Scientific Reports*. 2022. №12 (1). P. 7143. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11351-0>. (дата звернення: 11.08.2025).
35. Bedair A. Digital Image Analysis of Rock Fragmentation from Blasting (McGill University, 1996). *Scientific Reports*. 2024. №14. P. 4783. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55369-y>. (дата звернення: 11.08.2025).
36. Allen T. Powder Sampling and Particle Size Determination. Language: *English Paperback*. 2003. URL: ISBN: 9780444545558. (дата звернення: 11.08.2025).
37. Вибухова суміш: пат. 88299, Україна: МПК6 С 06В 31/12. №u2013 11525; заявл. 30.09.13; опубл. 11.03.14. Бюл. №5. 8 с.
38. Вибуховий прилад конденсаторний: пат. 98546, Україна: МПК6 F42D1/05. №a201012302, заявл. 18.10.10. опубл. 25.05.12. Бюл. №10. 15 с.
39. Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Рева Н.П., Кратковский И.Л. Механика взрывного разрушения пород различной структуры. К.: Наук. думка, 1984. 192 с.
40. Спосіб формування свердловинного заряду кумулятивної дії для вибухового руйнування гірських порід: пат. 86138, Україна: МПК6 E21C37/00, F42D3/04. № а 200708501; заявл. 24.07. 2007; опубл. 25.03. 2009. Бюл. №6. 15с.
41. Спосіб вибухового руйнування локально-тріщинуватих анізотропних гірських порід: пат. 105730, Україна: МПК6 E21C37/00 № а 201307372; заявл. 11.06. 2013; опубл. 10.06. 2014. Бюл. №11. 12 с.
42. Спосіб вибухового руйнування міцних анізотропних гірських порід складної будови на блоці: пат. 96511, Україна: МПК6 E21C37/00. № u201409009 заявл. 11.08. 2014; опубл. 10.02.15. Бюл. №3. 10 с.
43. Спосіб вибухового руйнування міцних гірських порід складної будови: пат. 137563, Україна: МПК 7 E21C 37/00. № u201904120 заявл. 08.04. 2019; опубл. 25.10. 2019. Бюл. №20. 13с.
44. Novikov L.A., Konoval V.M., Ishchenko K.S., Kinasz R.I., Malieiev Ye.V. Quality control of preparation of rock mass explosion in granite open pit. *Geo-Technical mechanics*. 2023. №. 166. P. 109–117. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2023.166.109>. (дата звернення: 11.08.2025).
45. Peng He, Yifan Xu3, Feng Jiang, et al. A rapid evaluation method of blasting effect based on optimized image segmentation algorithm and application in engineering. *Scientific Reports*. 2024. №14. P. 4783. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55369-y>. (дата звернення: 11.08.2025).
46. Jin X., Liang J., Fan X., et al. A Study on Image Segmentation of Quarry Blast Fragments Based on U-CARFnet. *PLoS ONE*. 2023. № 18(9): e0291115. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291115>. (дата звернення: 11.08.2025).
47. Mertz N.H., Palangio T.K., Franklin J.A. WipFrag Image-based granulometry system. *Measurement of blast Fragmentation*. (June). 2019. P. 91– 99. URL: <https://doi.org/10.1201/9780203747919-15>. (дата звернення: 11.08.2025).

Ishchenko K.S., Novikov L.A., Konoval V.M., Ponomarenko I. O., Mazur O.M., Demchenko O.V.
ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL APPROACHES TO ASSESSING THE EFFECTS
OF AN EXPLOSION IN A CRYSTALLINE MOUNTAIN ROCKS MASSIF

The work considers analytical and experimental studies of the influence of explosive charge designs of different cross-sectional shapes upon the action of an explosion in an array of crystalline rocks of complex structure in terms of the diameter of the average piece. Experimental studies were conducted in laboratory and field conditions of quarries to establish the nature of the destruction of granite samples by the explosion of charges of different cross-sectional shapes, the development of a mathematical model of calculation to substantiate the yield of crushing fractions by the diameter of the average piece according to the Rosin-Rammler law. It was established that during the explosive destruction of granite models, the uniformity of crushing is ensured by the use of charges of different cross-sectional shapes, namely: variable cross-section along the charge column and in the form of a square prism. Studies were conducted in the industrial conditions of the quarry of LLC "Uman Granite Quarry" to assess the distribution of the grain size distribution of the destroyed rock mass after a mass explosion using charges of various cross-sectional shapes by segmenting images of rock sample fragments using the U-CARFnet and U-Net models. A comparative evaluation of the proposed model with traditional image segmentation methods was carried out, and a formula for calculating the diameter of the average piece was empirically derived, which takes into account all the factors under which the rock is destroyed, which confirms the high convergence of the Rosin-Rammler law. The quality of the rock blown by the explosion on the quarry ledge was assessed by the diameter of the average piece using the U-CARFnet and WipFrag methods, which were processed using a computer program. The use of corrected parameters of drilling and blasting operations using combined designs of explosive charges of various cross-sectional shapes made it possible to reduce the diameter of the average piece of the blown rock mass and reduce the consumption of explosives. At the same time, the yield of the conditioned piece increased, which ensured uniform crushing of the broken rock mass.

Key words: solid medium, charge cavity, explosive, explosive destruction, stress wave.

Дата надходження статті: 01.09.2025

Дата прийняття статті: 22.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 620.3: 66.061.34 + 543.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/22>**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»**Бик М.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОКИСНО-ВІДНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИРОДНИХ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК ЕКСТРАКТУ ШИШОК ХМЕЛЮ, ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ РОЗЧИННИКАМИ

Метод циклічної вольтамперометрії було використано для оцінки електрохімічної поведінки та антиоксидантної активності екстрактів шишок хмелю, отриманих із використанням різних розчинників: води, етанолу та низькотемпературного евтектичного розчинника (НЕР) на основі L-проліну та гліцеролу. Вимірювання проводили на скловуглецевому електроді в діапазоні потенціалів від $-1,0$ до $+1,0$ В відносно Ag/AgCl . Водний екстракт виявив два виражених катодних піки ($E_{p.c1}$ та $E_{p.c2}$), що свідчить про наявність щонайменше двох груп електроактивних сполук із різними потенціалами відновлення, ймовірно, гідрофільних поліфенолів та інших антиоксидантних компонентів. На відміну від цього, етанольний екстракт характеризувався одним катодним піком, що вказує на переважання менш полярних фенольних сполук і зменшення внеску високополярних антиоксидантів. Екстракт, отриманий із використанням НЕР, демонстрував чітко виражені анодний та катодний піки, що підтверджує наявність електроактивних фенольних сполук з оборотною окисно-відновною поведінкою. Екстракт, отриманий у НЕР пролін–гліцерол, демонструє значно зміщений у від'ємну область анодний процес ($E_{p.a1} = -0,400$ В, $I_{p.a1} = 0,821$ мА) та один катодний пік при $0,112$ В ($I_{p.c1} = 0,05$ мА), що свідчить про іншу природу окисно-відновних реакцій та можливу стабілізацію антиоксидантних форм у матриці НЕР. Порівняльний аналіз показав, що вибір розчинника суттєво впливає як на склад, так і на електрохімічний профіль екстрактів хмелю, при цьому НЕР має потенціал як ефективний «зелений» розчинник для вилучення антиоксидантних компонентів. Екстракти шишок хмелю, багаті на фенольні сполуки з вираженими антиоксидантними властивостями, можуть бути перспективними у хімічній технології як природні антиоксиданти. Їхнє використання сприяє створенню екологічно безпечних та біорозкладних продуктів, що відповідають принципам «зеленої» хімії, зокрема засобів протикорозійного захисту.

Ключові слова: шишки хмелю, антиоксидантна активність, циклічна вольтамперометрія, поліфеноли, низькотемпературний евтектичний розчинник, пролін, гліцерол, екстракція.

Постановка проблеми. У сучасній фармацевтичній, харчовій та косметичній промисловості зростає інтерес до використання природних антиоксидантів як безпечних та ефективних засобів для запобігання окиснювальному процесу.

Шишки хмелю (*Humulus lupulus* L.) є цінним джерелом біологічно активних сполук, зокрема флавоноїдів, пренільованих фенолів (наприклад, ксантогумолу), поліфенолів, що виявляють виражену антиоксидантну активність [1-2]. Традиційні

© Дудка М.В., Воробйова В.І., Бик М.В., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

методи екстракції таких сполук передбачають застосування органічних розчинників, які можуть бути токсичними, леткими або несприятливими з екологічної точки зору[3].

Альтернативою є використання низькотемпературних евтектичних розчинників (НЕР) – нового покоління рідин, що поєднують високу розчинювальну здатність, біосумісність та екологічну безпеку [4]. Завдяки гнучкості у виборі компонентів та можливості тонкого налаштування фізико-хімічних властивостей, НЕР демонструють перспективність у вилученні антиоксидантів з рослинної сировини. Проте їх застосування для екстракції сполук з хмелю та оцінка біоактивності отриманих екстрактів залишаються недостатньо вивченими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки спостерігається значне зростання досліджень, що використання НЕР для екстракції природних органічних сполук. Використання НЕР гліцерин/L-аланін як НЕР для вилучення поліфенолів із *Humulus lupulus* було вивчено. Встановлено, що цей підхід демонструє високу ефективність вилучення, а оптимізовані за допомогою експериментального моделювання параметри, свідчать про підвищення екстрактивної здатності у присутності ультразвуку, хоча встановлено, що із підвищенням температури ефективність може знижуватися [1-3]. Також відомо про використання НЕР на основі молочної кислоти для вилучення антиоксидантних метаболітів із хмелю сорту «Auroga». Було виявлено, що фенольні сполуки складають основу отриманого екстракту, де понад 55% проантоціанідини та понад 28% флавоноїд-глікозиди, екстракт характеризується вираженою антиоксидантною активністю *in vitro* і *in vivo*. Автори стверджують, що еантиоксидантна ефективність навіть перевищує полі феноли з екстракту чаю за тих самих концентрацій [4-5]. У останніх дослідженнях [7-8] НЕР холін хлорид/пропіленгліколь (з 5% води) було використано, для екстракції ксанто-гумола і доведено, що максимальна ефективність екстракції 2,30 мг/г досягається при 60°C протягом 60 хв. екстракції.

Метою статті є отримання екстракту з шишок хмелю ароматичного сорту за допомогою НЕР Пролін-Гліцерол, оцінити антиоксидантну активність природних органічних сполук.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень. Антиоксиданті властивості екстрактів було вивчено методом циклічної вольтамперометрії. Метод ґрунтується на здатності органічних сполук, присутніх в екстрактах, до передачі електронів (відновлення). Оцінка антиоксидантної активності екстрактів шишок хмелю здійснювалась на основі параметрів, отриманих методом циклічної вольтамперометрії. Основним критерієм був потенціал анодного піку (E_{pa}), який відображає легкість окиснення електроактивних сполук: чим нижче значення E_{pa} , тим вища здатність до передачі електронів, а отже, сильніша антиоксидантна активність. Також враховувалися інтенсивність піків та кількість редокс-сигналів, що свідчать про присутність різних класів електроактивних речовин. Вимірювання проводили в ацетатному буфері (рН 4) при температурі 25 °С, що дозволяло моделювати біологічні умови та забезпечити відтворюваність результатів. Усі екстракти досліджувались при концентрації 0,5 мМ/л, що забезпечувало порівняння між зразками. Електрохімічні вимірювання проводилися в трьох-електродній комірці об'ємом 50 см³. Робочим електродом слугував електрод зі скловуглецю діаметром 2 мм; перед кожним вимірюванням його поверхню промивали органічним розчинником і висушували фільтрувальним папером. Як допоміжний електрод використовували платинову пластинку, а як електрод порівняння – насичений хлорсрібний електрод (SSCE), з'єднаний з основним об'ємом електроліту через сольовий місток. Досліджуваний екстракт змішували з ацетатним буфером (рН 4) та перхлоратом натрію у масовому співвідношенні 70:28:2/Екстракт/ ацетатний буфер/NaClO₄ безпосередньо перед внесенням у комірку. Було досліджено три екстракти шишок хмелю, що представляли різні сорти, при концентрації 0,5 мМ/л.

Таблиця 1

Параметри циклічних вольтамперограм екстрактів на скловуглецевому електроді у діапазоні потенціалів від –1,0 до +1,0 В (Ag/AgCl)

Екстракт шишок хмелю	Анодний процес		Катодний процес			
	E_{pa1}	I_{pa1}	E_{pc1}	I_{pc1}	E_{pc2}	I_{pc2}
Водний	0,380	0,160	-0,15	0,170	-0,519	0,25
Етанольний	0,269	0,096	-0,67	0,411	-	-
НЕР	-0,400	0,821	0,112	0,05	-	-

Отримані експериментальні результати.

На рис. 1 наведено циклічні вольтамперограми екстрактів шишок хмелю, отриманих різними екстрагентами, на скловуглецевому електроді.

Всі екстракти демонструють наявність як анодних ($E_{p,a}$), так і катодних ($E_{p,c}$) піків, що свідчить про окисно-відновлювальні процеси органічних сполук, присутніх у хмелі. Для екстракту НЕР пролін-гліцерил анодний пік ($E_{p,a}$) має найбільшу густину струму серед трьох екстрактів ($0,821 \text{ мкА/см}^2$). Анодний пік ($E_{p,a}$) при позитивних потенціалах ($\sim 0,85 \text{ В}$), відповідає процесам окиснення фенольних електроактивних компонентів екстракту. Катодний пік ($E_{p,c}$) при близько $0,05 \text{ В}$, свідчить про зворотне відновлення окиснених форм цих сполук. При порівнянні із іншими екстрактами, зокрема з водним екстрактом, у останнього спостерігається два катодні піки ($E_{p,c1}$ та $E_{p,c2}$), що свідчить про наявність двох різних електроактивних процесів відновлення, що відбуваються при різних потенціалах [8-9]. Це вірогідно пов'язано з різною природою (класами) компонентів в екстракті. Згідно літературних даних у водних екстрактах зазвичай присутні фенольні сполуки: флавоноїди, катехіни, фенольні кислоти, які мають різні окисно-відновні потенціали залежно від структури та кількості гідроксильних груп.

Так, при $E_{p,c2}$ ($E = -0,519 \text{ В}$) вірогідно відбувається відновлення більш «слабких» антиоксидантів або молекул з меншою електронною густиною. При $E_{p,c1}$ при менш негативному потенціалі ($E = -0,15 \text{ В}$) відбувається відновлення сильніших антиоксидантів або напівхінонових радикалів, утворених при анодному скануванні. Також, вірогідно ці два піки можуть свідчити про послідовні стадії одного багатостадійного процесу. Зокрема деякі поліфеноли окислюються у два етапи з утворенням проміжних форм (хінонів), які потім відновлюються на зворотному скані окремими піками [10].

В етанольному екстракті хмелю (рис. 1 б) немає двох виражених катодних піків головним чином через відмінності у розчинності, екстракційній здатності та стабільності поліфенольних сполук у цьому розчиннику. Відомо про селективність етанолу до певних фенольних сполук. Етанол краще екстрагує менш полярні та середньополярні сполуки (наприклад, ізо- α -кислоти, флавоноїди з меншою кількістю ОН-груп), але гірше витягує дуже полярні фенольні кислоти та таніни, які вносять вклад у другий катодний пік ($E_{p,c2}$) у водному екстракті [7-8]. При використанні води як екстрагенту екстрагуються гідрофільні антиоксиданти, які відновлюються при більш

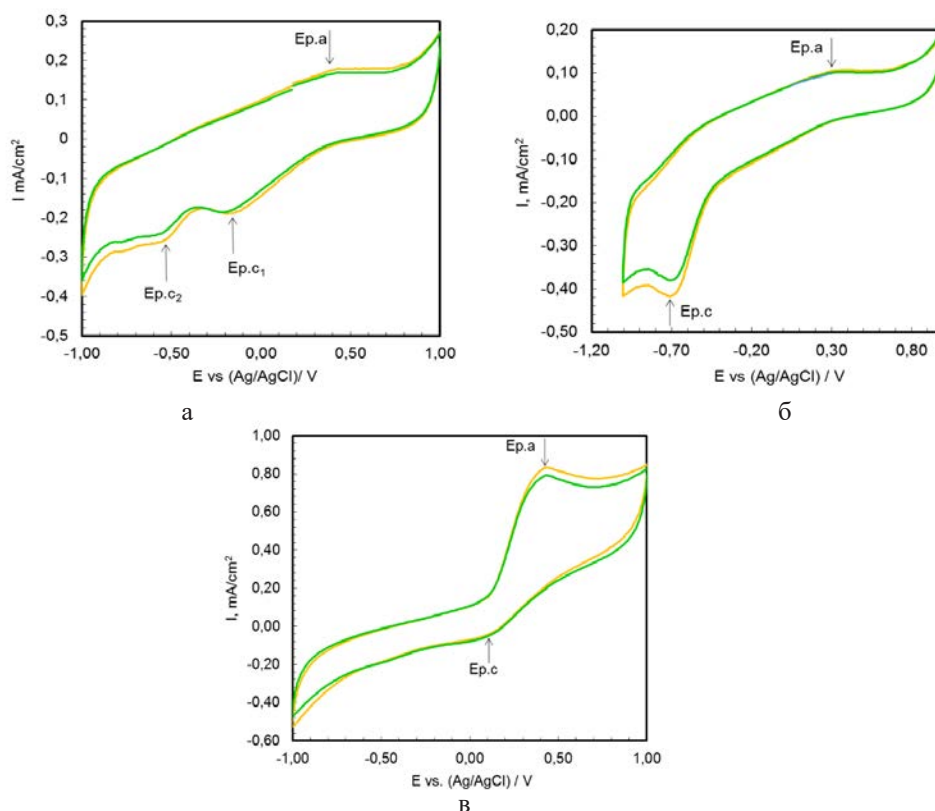


Рис. 1. Циклічна вольтамперометрія екстрактів шишок хмелю, що отримана на скловуглецевому електроді: а – водний екстракт, б – етанольний, в – отриманий НЕР (пролін-гліцерол). Швидкість розгортки потенціалу – 100 мВ/с , $t = 25^\circ \text{C}$

негативному потенціалі ($E_{p.c2}$). В етанолі їх кількість значно менша, тож пік просто не формується або «зливається» з фоновим струмом.

Електрохімічний метод визначення окисно-відновних властивостей добре корелює зі спектрофотометричним аналізом згідно з літературними даними [11], що підтверджує достовірність отриманих результатів, що водні екстракти проявляють меншу антиоксидантну активність, тоді як гідроетанольні екстракти (50 : 50, 70 : 30) мають зазвичай суттєву вищу радикал-споживаючу активність.

Висновки. Найвищий анодний пік зафіксовано для екстракту, отриманого у НЕР, що вказує на найбільшу концентрацію або електрохімічну активність антиоксидантів у цьому зразку. Водний та етанольний екстракти демонструють нижчі значення пікового струму, причому у водного екстракту вони дещо вищі, ніж у етанольного. За результатами циклічної вольтамперометрії встановлено суттєві відмінності в електрохімічній поведінці екстрактів шишок хмелю залежно від типу розчинника. Водний екстракт характеризується наявністю анодного піка при 0,380 В

($I_{p.a1} = 0,160$ мА) та двох катодних піків: $E_{p.c1} = -0,15$ В ($I_{p.c1} = 0,170$ мА) і $E_{p.c2} = -0,519$ В ($I_{p.c2} = 0,25$ мА), що свідчить про присутність двох груп електроактивних сполук з різними потенціалами відновлення. Етанольний екстракт має анодний пік при 0,269 В ($I_{p.a1} = 0,096$ мА) та один катодний пік при $-0,67$ В ($I_{p.c1} = 0,411$ мА), без другого катодного процесу, що вказує на переважання менш полярних антиоксидантів. Екстракт, отриманий у НЕР пролін-гліцерол, демонструє значно зміщений у від'ємну область анодний процес ($E_{p.a1} = -0,400$ В, $I_{p.a1} = 0,821$ мА) та один катодний пік при 0,112 В ($I_{p.c1} = 0,05$ мА), що свідчить про іншу природу окисно-відновних реакцій та можливу стабілізацію антиоксидантних форм у матриці НЕР.

Фінансування. Дослідження виконані в рамках конкурсу НФДУ «Наука для зміцнення обороноздатності України». Тема. Інноваційні методики та засоби швидкого визначення забруднюючих речовин на основі сполук гідразину, що потрапляють в навколишнє середовище внаслідок воєнних дій та аварійного розливу ракетних/авіаційних палив 2023.04/0069.

Список літератури:

1. Gorjanović S., Pastor F. T., Vasić R., Novaković M., Simonović M., Milić S., Sužnjević D. Electrochemical versus spectrophotometric assessment of antioxidant activity of hop (*Humulus lupulus* L.) products and individual compounds. *J. Agric. Food Chem.* 2013. № 61(38). P. 9089–9096. <https://doi.org/10.1021/jf401718z>
2. Kowalska G., Bouchentouf S., Kowalski R., Wyrostek J., Pankiewicz U., Mazurek A., Sujka M., Włodarczyk-Stasiak M. The hop cones (*Humulus lupulus* L.): Chemical composition, antioxidant properties and molecular docking simulations. *J. Herb. Med.* 2022. № 33. P. 100566. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2022.100566>
3. Maliar T., Nemeček P., Ůrgeová E. та ін. Secondary metabolites, antioxidant and anti-proteinase activities of methanolic extracts from cones of hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars. *Chem. Pap.* 2017. № 71. P. 41–48. <https://doi.org/10.1007/s11696-016-0034-2>
4. Kolenc Z., Hribernik T., Langerholc T., Pintarič M., Prevolnik Povše M., Bren U. Antioxidant activity of different hop (*Humulus lupulus* L.) genotypes. *Plants.* 2023. № 12. P. 3436. <https://doi.org/10.3390/plants12193436>
5. Astray G., Gullón P., Gullón B., Munekata P. E. S., Lorenzo J. M. *Humulus lupulus* L. as a natural source of functional biomolecules. *Appl. Sci.* 2020. № 10. P. 5074. <https://doi.org/10.3390/app10155074>
6. Yalçınçıray Ö., Vural N., Anlı R. E. Effects of non-alcoholic malt beverage production process on bioactive phenolic compounds. *Food Meas.* 2020. № 14. P. 1344–1355. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00384-6>
7. Ivanova B., Spiteller M. Solid-state determination of hop bitter acids in beer by UV–MALDI–Orbitrap mass spectrometry. *Food Meas.* 2014. № 8. P. 343–355. <https://doi.org/10.1007/s11694-014-9195-2>
8. Rubira A., Rodríguez-Rebelo F., Del-Río P. G., Romani A., Gullón B. Valorization of hop (*Humulus lupulus* L.) pruning to produce valuable compounds using two biorefinery strategies. *Ind. Crops Prod.* 2024. № 219. P. 119174. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119174>
9. Rodrigues Arruda T., Fontes Pinheiro P., Ibrahim Silva P. Exclusive raw material for beer production? Addressing greener extraction techniques and the prospects of hops. *Food Bioprocess Technol.* 2022. № 15. P. 275–305. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02716-w>
10. Mohanasundaram S., Ramirez-Asis E., Quispe-Talla A. et al. Experimental replacement of hops by mango in beer. *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.* 2022. № 13. C. 132–145. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01308-3>
11. Benbassat N., Yoncheva, K., Hadjimitova, V., Hristova N., Konstantinov S., Lambov N. Influence of the extraction solvent on antioxidant activity of *Althaea officinalis* L. root extracts. *Open Life Sciences*, № 2 (9), 2014, P. 182–188. <https://doi.org/10.2478/s11535-013-0245-2>

Dudka M.V., Vorobiova V.I., Byk M.V. THE REDOXIDATION (REDOX) PROPERTIES OF NATURAL ORGANIC COMPOUNDS OF HOPS CONES EXTRACT OBTAINED BY VARIOUS SOLVENTS

Cyclic voltammetry was used to evaluate the electrochemical behavior and antioxidant activity of hop cone extracts obtained using different solvents: water, ethanol, and a low-temperature eutectic solvent (LTE) based on L-proline and glycerol. Measurements were performed on a glassy carbon electrode in the potential range from -1.0 to $+1.0$ V vs. Ag/AgCl. The aqueous extract revealed two pronounced cathodic peaks ($Ep.c_1$ and $Ep.c_2$), indicating the presence of at least two groups of electroactive compounds with different reduction potentials, probably hydrophilic polyphenols and other antioxidant components. In contrast, the ethanol extract was characterized by a single cathodic peak, indicating the predominance of less polar phenolic compounds and a reduced contribution of highly polar antioxidants. The extract obtained using NER demonstrated clearly pronounced anodic and cathodic peaks, which confirms the presence of electroactive phenolic compounds with reversible redox behavior. The extract obtained in NER proline–glycerol demonstrates a significantly shifted anodic process into the negative region ($Ep.a1 = -0.400$ V, $Ip.a1 = 0.821$ mA) and one cathodic peak at 0.112 V ($Ip.c1 = 0.05$ mA), which indicates a different nature of redox reactions and possible stabilization of antioxidant forms in the NER matrix. Comparative analysis showed that the choice of solvent significantly affects both the composition and electrochemical profile of hop extracts, while NER has the potential as an effective “green” solvent for the extraction of antioxidant components. Hop cone extracts, rich in phenolic compounds with pronounced antioxidant properties, may be promising in chemical technology as natural antioxidants. Their use contributes to the creation of environmentally safe and biodegradable products that meet the principles of “green” chemistry.

Key words: hop cones, antioxidant activity, cyclic voltammetry, polyphenols, deep eutectic solvent, proline, glycerol, extraction.

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 15.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Єфименко В.В.

Національний університет біоресурсів та природокористування України

Олександренко В.П.

Хмельницький національний університет

Кустовська А.Д.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Руденко В.М.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Матвєєва О.Л.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Трофімов І.Л.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ВИРОБНИЦТВА ІМПЛАНТАНТІВ ТА ПРОТЕЗІВ

Стаття присвячена актуальним питанням використання полімерних матеріалів у виробництві імплантатів та протезів, з особливим акцентом на фторполімерні покриття для титанових конструкцій. Розглянуто перспективи й виклики застосування полімерів у сучасній біоінженерії, зокрема в ортопедії та імплантології, де традиційно домінують титанові сплави. Незважаючи на високі механічні характеристики та біосумісність титану, його протизношувальні властивості є обмеженими, що потребує застосування інноваційних покриттів.

У роботі проаналізовано переваги фторопластів – матеріалів із надзвичайно низьким коефіцієнтом тертя та високою хімічною стійкістю, водночас зазначено їх недоліки, зокрема низьку адгезію до металевих поверхонь. Для усунення цих обмежень запропоновано використання тришарових фторполімерних покриттів на основі Ф-30П, модифікованих нанодобавками оксидів цирконію, графіту та аміноорганокремнезему.

Експериментальні дослідження показали, що введення наночастинок $Zr(Y)O(OH)_2$ значно підвищує адгезію, зносостійкість, еластичність і мікротвердість покриттів. Найкращі результати отримано при використанні 2 мас. % модифікаторів: стійкість до подряпин зросла у 14,35 разів, мікротвердість – у 3,4 рази, термостійкість – до 235 °С. Описано механізми, що лежать в основі підвищення характеристик – формування сферолітичних структур, каркасних міжфазних зв'язків та захисного шару на межі «полімер-метал».

Охарактеризовано класифікацію медичних полімерів за походженням, біодеградацією та біосумісністю, наведено порівняння природних і синтетичних полімерів. Значну увагу приділено біомастилам – нанорідинам на полімерній основі, які використовуються для зменшення тертя у штучних суглобах. Наведено сучасні напрями досліджень у галузі біоактивних покриттів, «розумних» матеріалів та нанокомпозитів.

Застосування модифікованих фторполімерних покриттів суттєво підвищує довговічність і ефективність імплантантів, знижуючи ризики, пов'язані з їх експлуатацією, і відкриває перспективи для подальших досліджень у галузі функціональних полімерних матеріалів у медицині.

Ключові слова: медичні вироби, високомолекулярні сполуки, полімерні матеріали, фторопластові покриття, властивості, адгезія, зносостійкість, технологічні фактори.

Постановка проблеми. У сучасній медицині однією з найперспективніших галузей є біоінженерія, зокрема розробка та впровадження імплантів і протезів, які здатні відновлювати функції органів і тканин людського тіла. Одним з ключових чинників, що визначають успішність таких технологій, є вибір матеріалів, з яких виготовляються відповідні конструкції.

Розвиток біоінженерії в ортопедії призвів до широкого використання титанових сплавів у якості основного матеріалу для виготовлення ендопротезів. Особливо актуальним є застосування титанових вставок при заміні кульшового, колінного, плечового та ліктьового суглобів. Висока біосумісність, стійкість до корозії та сприятливі механічні властивості роблять титан незамінним матеріалом у хірургії кістково-суглобової системи. Не дивлячись на переваги титанові сплави мають незадовільні протизношувальні властивості, що призводить до пошуку протизношних рідин, які заповнили б порожнини між суглобом і титановою вставкою для зменшення сили тертя.

Серед усього різноманіття матеріалів особливе місце займають полімерні матеріали – речовини, що поєднують у собі гнучкість, міцність, біосумісність і можливість модифікації для конкретних клінічних задач.

Полімери активно використовуються у виробництві ортопедичних, стоматологічних, кардіологічних імплантів, штучних органів, а також у тимчасових та постійних протезах. Їхні властивості дають змогу не лише створювати високо-ефективні та функціональні пристрої, але й розширювати можливості персоналізованої медицини за допомогою 3D-друку, біопринтингу та інших інноваційних методів [1].

Фторопластові покриття знаходять широке застосування як у машинобудуванні та і в медичних виробках. Вони унікальні за своїми властивостями, особливо за хімічною стійкістю, стійкі практично до всіх хімічних речовин. Покриття з фторопластів мають низький коефіцієнт тертя, стійкі до зношування та ударів.

Недоліком фторопластових покриттів є їх низька адгезійна міцність до металевої підложки і недостатньо висока зносостійкість. Тому дослідження спрямовані на подолання цих недоліків є досить актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Титанові вставки стали основою сучасного ендопротезування завдяки своїм унікальним властивостям. Водночас ефективність імплантації

значною мірою залежить від індивідуального підходу до пацієнта, вибору технології фіксації та подальшого моніторингу. Подальші дослідження спрямовані на мінімізацію ускладнень і вдосконалення біоінженерних характеристик імплантів.

Титанові імпланти використовуються при:

- дегенеративно-дистрофічних змінах (артрозах);
- наслідках тяжких переломів;
- ревматоїдному артриті;
- онкологічних резекціях.

Імпланти можуть бути встановлені цементним способом (з використанням поліметилметакрилату) або через безцементне кріплення, що ґрунтується на біологічному зрощенні з кісткою.

Незважаючи на переваги, застосування титанових вставок пов'язане з низкою проблем:

- *Остеоліз.* У результаті мікрорухів або тертя між компонентами протеза утворюються частки зносу (переважно поліетиленові), які можуть викликати асептичне запалення й резорбцію кістки навколо імпланта.

- *Періімплантна інфекція.* Може проявлятися як у гострій, так і в хронічній формі, вимагаючи ревізійного втручання або повної заміни протеза.

- *Нестабільність імпланта.* Пов'язана з недостатньою фіксацією або неадекватною остеointegraцією, особливо в осіб з остеопорозом.

- *Алергічні реакції.* Хоча рідкісні, існують повідомлення про індивідуальну гіперчутливість до титану або домішок у сплавах.

- *Металоз* – накопичення іонів металу в тканинах навколо імпланта, що може спричинити запалення або навіть некроз.

Титанові вироби (Ti) медичного призначення характеризується низькою щільністю (приблизно 4,5 г/см³), високим модулем пружності (105–120 ГПа) та чудовою стійкістю до агресивного впливу біологічного середовища. Найпоширенішими у медичній практиці є сплави Ti-6Al-4V (титан-алюміній-ванадій) та Ti-6Al-7Nb, які демонструють високу механічну міцність та знижений ризик токсичності. Окрім того, титан підтримує процес остеointegraції – прямого зрощення з кістковою тканиною без утворення фіброзного шару, що забезпечує тривалу стабільність імпланта.

Використовуючи титанові вставки у суглобах, особливо при стираннях чашечки кістки, щоб зменшити силу тертя та знос у вузлах тертя суглобів вводять біомасила – біозмашуванні нанорідини на основі полімерів, які забезпечують

покращені характеристики змащування та біосумісність, що значно зменшує тертя у штучних суглобах, а наявність дисульфиду молібдену та йонів міді покращують протизношувальні властивості до 20%, продовжуючи термін служби штучних суглобів. Біосумісні матеріали, такі як наночастинки на основі хітозану, зменшують тертя та мають протизапальні властивості, що робить їх ідеальними для лікування остеоартриту [2-4]. Крім того, екологічно чисті біомастила, модифіковані багатостінними вуглецевими нанотрубками, покращують змащування, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище. Структурно, насичені маслом полімерні композити з мезопористими структурами забезпечують стабільне змащування при різних навантаженнях, а нанорідини можуть адаптуватися до динамічних умов синовіальних суглобів, підтримуючи змащування навіть під високим тиском [5-6].

Метою статті є аналіз сучасного стану застосування полімерних матеріалів у виробництві імплантатів та протезів, характеристика їх властивостей, переваг і недоліків, а також пошук високоадгезійних полімерних покриттів для нанесення на титанові поверхні для покращення протизносних та біосумісних властивостей.

Виклад основного матеріалу. Останні дослідження дозволяють говорити про активний розвиток титанових імплантів із покриттями, структурованою поверхнею, нанотехнологіями. Ключові цілі – покращення остеоінтеграції, зменшення інфекцій та максимально тривала стабільність.

Водночас, з'являються і нові виклики: корозія, виділення наночастинок, гіперчутливість у деяких пацієнтів і механізми тканинного фіброзу. Для впровадження нових технологій необхідні клінічні випробування та довгострокове спостереження.

Полімери, що застосовуються в медицині, класифікують за кількома критеріями: за походженням, за властивостями, за здатністю до біодеградації та взаємодією з біологічним середовищем.

За походженням:

- Природні полімери – колаген, желатин, хітозан, альгінати. Характеризуються високою біосумісністю та біоактивністю, однак можуть мати обмежену механічну міцність і стабільність.

- Синтетичні полімери – поліетилен, поліметилметакрилат, поліуретан, полілактидна кислота. Вони забезпечують високу міцність, контрольовані властивості, але можуть потребувати додаткових заходів для підвищення біосумісності.

За здатністю до біодеградації:

- Біодеградовані полімери – розкладаються в організмі з утворенням нетоксичних метаболітів (наприклад, PLA, PCL). Використовуються для тимчасових імплантів, які не потребують повторного хірургічного втручання.

- Нерозкладні полімери – зберігають стабільність в організмі протягом тривалого часу (наприклад, PE, PMMA). Застосовуються для постійних конструкцій.

За ступенем біосумісності:

- Біоінертні – практично не взаємодіють з біологічними тканинами (наприклад, поліетилен високої щільності).

- Біоактивні – сприяють інтеграції з навколишніми тканинами або навіть стимулюють ріст клітин (наприклад, композити на основі гідроксиапатиту з полімерною матрицею).

Для ефективного використання в медичних пристроях полімери мають відповідати низці специфічних вимог. Основні з них:

Механічні властивості: міцність на розтяг, гнучкість, пружність і в'язкість мають відповідати біомеханічним властивостям тканин, які замінюються. Наприклад, для ортопедичних імплантів потрібні високоміцні матеріали, тоді як для м'якотканинних протезів – еластичні.

Хімічна стабільність: Полімери повинні бути стійкими до впливу біологічних рідин, ферментів і змін pH, не піддаючись гідролізу чи окисненню.

Біосумісність: матеріали не повинні викликати токсичних, алергічних або імунних реакцій. В ідеалі – повинні сприяти інтеграції з живими тканинами.

Стерилізація: полімерні вироби мають зберігати свої властивості після обробки методами стерилізації (етиленоксид, гамма-опромінення, автоклавування).

Які ж проблеми та виклики щодо використання полімерів у медицині.

Попри значні переваги, полімерні матеріали не позбавлені недоліків. Розуміння потенційних проблем є ключем до безпечного та ефективного їх використання в імплантології та протезуванні.

Довговічність. Деякі полімери з часом піддаються старінню, втрачають механічні властивості, тріскаються або зношуються. Це особливо критично для імплантів, що мають служити протягом десятиліть.

Біологічна відповідність. Навіть біосумісні матеріали можуть викликати локальні запальні реакції, фіброз або капсульне утворення. Випадки алергії на компоненти полімерів хоч і рідкісні, але можливі.

Контрольована біодеградація. Для біорозкладних полімерів надзвичайно важливо забезпечити прогнозований і рівномірний процес розкладу. Занадто швидкий або нерівномірний розпад може спричинити механічну нестабільність або запалення.

Стерилізація. Деякі полімери нестійкі до стандартних методів стерилізації, що може обмежити їх використання у клінічній практиці.

Екологічні та етичні аспекти.

Виробництво полімерів може бути ресурсомістким і супроводжуватися забрудненням довкілля. У разі використання природних полімерів виникають також питання біоетики.

Галузь полімерних матеріалів у медицині стрімко розвивається, зосереджуючи увагу на інтелектуальних рішеннях та інтеграції з біотехнологіями. Це спонукає розвиток нових матеріалів:

Нанополімери. Використання наночастинок у полімерній матриці дає змогу змінювати поверхневі властивості матеріалів, поліпшувати адгезію клітин, контролювати вивільнення лікарських речовин.

Смарт-матеріали. Такі полімери реагують на зовнішні стимули (температуру, pH, вологу) – наприклад, змінюють форму або вивільняють активні речовини. Перспективні для «розумних» імплантів і систем доставки ліків.

Тканинна інженерія. Поєднання полімерів з клітинними технологіями дозволяє створювати гібридні системи – каркаси, заселені живими клітинами, що з часом перетворюються на функціональні тканини (кістка, шкіра, хрящ).

Гібридні та біоактивні композити. Поєднання полімерів з керамікою або металами дає змогу оптимізувати механічні та біологічні властивості матеріалів для більшої універсальності у хірургії.

Біомастила є ключовим фактором у підвищенні продуктивності та довговічності біомедичних пристроїв, особливо штучних суглобів та імплантів, шляхом імітації природних механізмів змащування в біологічних системах. Біополімери, такі як альгінат, хітозан та полімолочна кислота (PLA), поєднуються з наночастинами для створення нанокомпозитів з покращеними механічними та біологічними властивостями [6-8]. Ці матеріали демонструють підвищену теплопровідність, стабільність та біосумісність, що робить їх придатними для застосування в доставці ліків та тканинній інженерії. Розробка передових біомас-тил, включаючи мережі полімер-наночастинок, усуває багато обмежень традиційних мас-тил.

Наприклад, композити з надвисокомолекулярного поліетилену (UHMWPE), армовані вуглецевими нанотрубками, демонструють виняткову зносостійкість, зменшуючи об'єм зносу до 93% та досягаючи показників зносу до $5,6 \times 10^{-6}$ мм³/Нм. Такі досягнення ілюструють трансформаційний потенціал нанорідин на основі полімерів у біомедичних застосуваннях.

Визнаючи міждисциплінарний характер біотрибології, Ахай та Вадхва (2024) виступають за посилення співпраці між експертами в галузі трибології, матеріалознавства та біомеханіки для ефективного вирішення постійних проблем.

Нанорідини на основі полімерів також демонструють універсальні властивості зниження тертя. Наприклад, тиксотропні гідрогелі в поєднанні з UHMWPE досягають коефіцієнтів тертя нижче 0,01, тоді як кополімери РМРС, щеплені хітозаном, демонструють порівнянне зниження тертя в біологічних середовищах. Крім того, захисні плівки, утворені внаслідок синергетичної взаємодії між Nano-MoS₂ та графеном, значно покращують трибологічні характеристики, зменшуючи знос через механізми кочення та ковзання. Завдяки своїй високій площі поверхні та структурній міцності, вуглецеві нанотрубки сприяють зменшенню площі зносу на 29% навіть при низьких концентраціях [9-10].

Незважаючи на ці досягнення, біомастила на основі полімерів стикається з проблемами, пов'язаними зі стабільністю в біомедичних середовищах. Включення природних біополімерів забезпечує нетоксичність та екологічність, що є важливим для медичного використання. Наночастинок додатково підвищують механічну міцність та біологічну активність, що сприяє застосуванню в загоєнні ран, доставці ліків та регенеративній медицині. Однак такі фактори, як іонна сила та коливання температури, можуть погіршити дисперсію та ефективність наночастинок. Досягнення у впровадженні добавок, таких як оксид графену та тиксотропні гідрогелі, подовжили термін служби біомас-тил у суглобах, дозволяючи біомастилам, отриманим з жирних кислот, підтримувати змащення та протистояти окислювальній деградації за фізіологічних умов [5-11].

Поява технологій самовідновлення та інтелектуального змащування пропонує нові можливості для підвищення довговічності та адаптивності біомас-тильних матеріалів у штучних суглобах та інших медичних пристроях.

Водночас, еволюційна траєкторія мастильних матеріалів на основі рослинних олій привернула

значну увагу, що підтверджується їхньою екологічною стійкістю та зменшеним впливом на навколишнє середовище. Як уточнюють Павар та ін. (2022), рослинні олії мають помітні переваги завдяки своїй біорозкладності, відновлюваності та мінімалістичному впливу на навколишнє середовище. Ці мастильні матеріали на біологічній основі демонструють покращені реологічні та трибологічні властивості при поєднанні з наночастинками. Однак постійні проблеми, такі як неоптимальна термоокиснювальна стабільність та незадовільна продуктивність за низьких температур, вимагають рішучого вирішення. Таким чином, необхідні ґрунтовні дослідницькі зусилля для уточнення властивостей мастильних матеріалів на основі рослинних олій, позиціонуючи їх як можливі заміники звичайних мінеральних та синтетичних олів.

Було показано, що включення нанодобавок підвищує стабільність, затримуючи деградацію до $37,5^{\circ}\text{C}$, а також покращуючи в'язкість та трибологічні характеристики. Окислювальна деградація також створює проблеми, хоча антиоксиданти, такі як оксид графену ($\text{C}_x\text{O}_y\text{H}_z$), можуть допомогти пом'якшити ці ефекти. Крім того, рівень рН може суттєво впливати на ефективність біомастила в суглобах, як це спостерігалось в дослідженнях, зосереджених на фізіологічних умовах.

Сумісність із матеріалами з'єднань, включаючи поліетилен надвисокої молекулярної маси (UHMWPE), є важливою для зменшення зносу та збільшення терміну експлуатації пристрою. У штучних суглобах знос впливає на функціональність пристрою, а такі фактори, як змішане змащення, можуть ускладнювати вантажопідйомність при різних навантаженнях.

Полімерні покриття, такі як поліетиленгліколь (ПЕГ) та метакрилат, ефективно запобігають адсорбції білка на наночастинках, зберігаючи таким чином змащувальну здатність у біологічних середовищах. Наночастинки, покриті такими матеріалами, як борат та полімермодифікований оксид цинку, здатні утворювати міцні трибоплівки, що призводить до зменшення тертя на 95% та зносу на 90%. Крім того, самовідновлювальні трибоплівки можуть зменшити тертя на 83%. Функціоналізовані наночастинки, включаючи графен та маггеміт, відомі тим, що затримують початок окиснення на $18\text{--}37,5^{\circ}\text{C}$, тим самим покращуючи трибологічні характеристики. Крім того, амфіфільні та діоксидні (SiO_2) покриття покращують дисперсійну стабільність та термостійкість, одночасно зменшуючи агрегацію. Біо-

сумісні покриття мають вирішальне значення для вирішення проблем токсичності, пов'язаних з наночастинками [10-12].

Нанорідини відіграють вирішальну роль у біомедичних імплантатах, значно зменшуючи тертя та покращуючи продуктивність за допомогою різних механізмів. Одним з ключових механізмів є згладжування поверхні, де наночастинки, такі як поліметилметакрилат (ПММА) та полімолочна кислота (ПЛА), ефективно заповнюють нерівності поверхні, зменшуючи коефіцієнт тертя до 24,3%. Ці наночастинки, заповнюючи нерівності поверхні, одночасно утворюють захисну наноплівку, яка заповнює поверхневі порожнини, що призводить до плавнішого руху, зменшення зносу та мінімізації втрат енергії. Цей захисний шар не тільки покращує змащування, але й підвищує біосумісність, сприяючи покращеній продуктивності імплантатів.

Для подальшого підвищення однорідності та точності нанесення наночастинок були розроблені такі методи, як струменевий друк, що дозволяють точно контролювати осадження наночастинок та забезпечувати стабільний захист поверхні. Крім того, моделювання молекулярної динаміки забезпечує глибше розуміння можливостей цих наночастинок щодо зниження тертя, демонструючи зниження тертя до 96,75% за оптимальних умов. Ці результати підкреслюють значний потенціал нанорідин для покращення експлуатаційних властивостей біомедичних імплантатів.

Для підтримки оптимальної продуктивності нанорідин поверхнево-активні речовини відіграють вирішальну роль, зменшуючи в'язкість, покращуючи характеристики текучості та забезпечуючи стабільну роботу мастила. Однак, незважаючи на перспективність нанорідин, їхня ефективність залежить від таких факторів, як концентрація та розмір наночастинок, що підкреслює необхідність ретельної оптимізації для максимізації їх практичних переваг. Подальший прогрес у цій галузі ще більше розширить застосування нанорідин у біомедичних імплантатах.

Нанорідини на основі полімерів є дуже перспективним інноваційним рішенням для тотального ендопротезування суглобів (TJR), особливо при ендопротезуванні кульшового та колінного суглобів. Основними цілями є покращення змащування, мінімізація зносу та підвищення біосумісності імплантатів. Нещодавні дослідження зосереджені на використанні біосумісних полімерних наночастинок (NP), таких як поліметилметакрилат (PMMA) та полімолочна кислота (PLA),

для покращення змащування суглобів. Наприклад, у дослідженні Сіму та ін. (2023) наночастинки PLA у поєднанні з гіалуроновою кислотою (НА) та поверхнево-активними речовинами використовувалися для моделювання контакту кістки та хряща між сталеною кулькою та силіконовим еластомером. Їхні результати показали, що нанорідини PLA зменшили коефіцієнт тертя (CoF) до 24,3%, головним чином шляхом згладжування поверхні та покращення змащування. Це відкриття свідчить про потенційне раннє втручання при остеоартриті (ОА). Зниження CoF підкреслює потенціал нанорідин на основі полімерів для мінімізації зносу, що має вирішальне значення для продовження терміну експлуатації штучних суглобів [8-12].

У нашій роботі [13-14] розглядається інший шлях вирішення проблеми протизношувальних властивостей протезів суглобів, а саме, не використання біозмащувальних матеріалів, а застосування модифікованих полімерних матеріалів нанесених на підложку.

Виклад основного матеріалу. Застосовуючи прилад для визначення адгезії та стійкості покриттів до пошкодження шкрябанням NOVOTEST ЦІ-М вивчено стійкість тришарових фторполімерних покриттів Ф-30П до пошкоджень шляхом шкрябання за навантаження 7 кг (68,6 Н). Грунтовий шар складався з 72 мас. % фторполімеру Ф-30П, 25 мас. % графіту С-1 та 3 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу. Проміжний шар містив меншу кількість промоторів адгезії, необхідних для зчеплення з основою, а також наповнювачі з високою тепло- та електропровідністю: 79 мас. % Ф-30П, 20 мас. % графіту С-1 та 1 мас. % аміноорганокремнезему.

Оплавлення ґрунтувального і проміжного шарів на основі фторполімеру Ф-30П викону-

вали за температури 245–250 °С протягом однієї години.

Оскільки основне завдання нанесення зовнішнього шару фторопластового покриття на основі Ф-30П – підвищення зносостійкості, то до його складу було введено 1–3 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С), або 1–3 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (700 °С), або 1–3 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого йонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ і 17 мас. % графіту С-1, а також 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу. Масовий вміст графіту С-1 у зовнішньому шарі в порівнянні з проміжним був зменшений від 20% до 17% для забезпечення достатньої адгезійної міцності, теплопровідності і електропровідності покриття. Оплавлення зовнішнього шару тришарового покриття на основі фторполімеру Ф-30П виконували при температурі 228–235 °С протягом двох годин та охолоджували до кімнатної температури зі швидкістю 30–40 °С за годину.

Аналіз отриманих результатів показав, що введення наномодифікаторів оксидів цирконію сприяє інтенсивному структуруванню матриці, оскільки наночастинки можуть створювати ансамблі за типом кластерів. В результаті створюється армована полімерна система, що відрізняється підвищеними міцнісними і триботехнічними характеристиками. Застосування наночастинок призвело до армування полімерної матриці, що підвищило її міцність і триботехнічні властивості. Показник стійкості до шкрябання підвищився залежно від типу нанодобавки:

- у 5,02 рази з 1% ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С),
- у 8,98 разів з 1% ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (700 °С),
- у 14,35 разів з 2% $Zr(Y)O(OH)_2$ – порівняно з немодифікованим покриттям Ф-30 П (рис. 1).

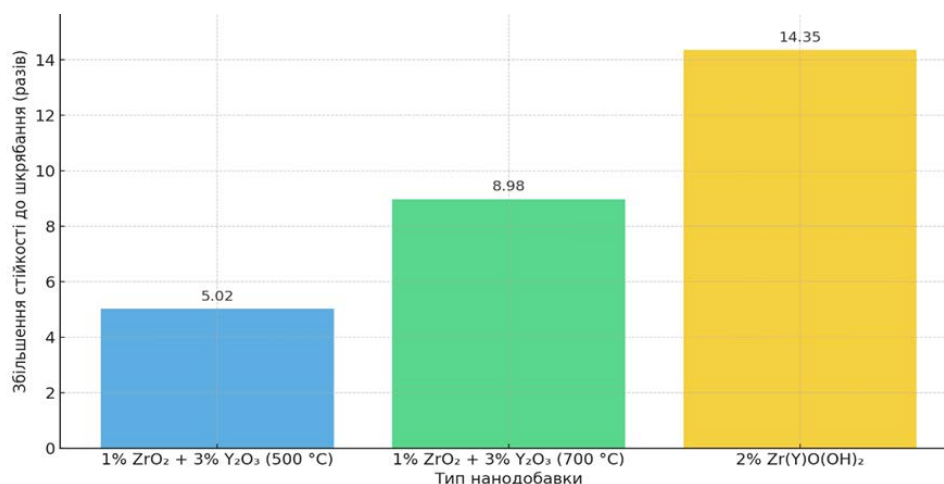


Рис. 1. Залежність стійкості до шкрябання від типу нанодобавки

Видно, що найефективнішим модифікатором є $Zr(Y)O(OH)_2$ при вмісті 2% мас., який забезпечує підвищення стійкості у 14,35 разів.

Поліпшення адгезії обумовлене взаємодією наночастинок з макромолекулами на межі полімеру та наповнювача сприяє утворенню сферолітичних структур, підвищує пластичність і міцність матеріалу, особливо при використанні аморфного гідроксиду цирконію з ітрієм.

Дослідження на абразивостійкість фторопластових покриттів виконували на приладі для випробування матеріалів на стійкість до стирання ДИТ-М. Цей показник особливо важливий, коли медичний виріб, такий як суглоб, експлуатується тривалий час. Встановлено, що при введенні до складу зовнішнього шару тришарового фторопластового покриття на основі Ф-30 П 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас.% аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас.% ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С) абразивостійкість покриття зростає у 1,38 разів. Результати досліджень представлені на рис. 2.

Встановлено, що еластичність збільшилась для тришарового фторопластового покриття до складу зовнішнього шару якого входять:

а) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (500 °С) у 1,64 рази, б) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % ZrO_2 + 3% Y_2O_3 (700 °С) у 1,68 разів, в) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, ле-

ваного іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ у 1,84 рази в порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П. (рис. 2).

Механізм дії наномодифікаторів у фторполімерній матриці Ф-30П полягає у підвищенні щільності структурних утворень завдяки формуванню міжфазних шарів із впорядкованим розміщенням на межі «полімер – наповнювач». За низького вмісту наповнювача (1–3 мас. %) спостерігається прискорення процесу кристалізації, тоді як перевищення цієї концентрації призводить до її уповільнення через взаємодію частинок між собою, їх агломерацію, зростання розмірів і зниження активності в структуроутворенні.

У межах 1–3 мас. % наповнювача в композиції відбуваються такі структурні трансформації: з'являються сфероліти, спочатку неоднорідні за формою і розмірами, які згодом уніфікуються, збільшується щільність пакування, а наночастинки рівномірно розподіляються в об'ємах між полімерними елементами, зв'язуючись між собою в каркасні структури. Це сприяє підвищенню зносостійкості матеріалу при збереженні або незначному покращенні фізико-механічних властивостей.

Паралельно спостерігається активізація як руйнівних, так і стабілізуючих процесів у поверхневих шарах матеріалу, де наповнювач виконує функцію зшивального агента для продуктів трибохімічного розкладу макромолекул. Саме це забезпечує зростання зносостійкості композицій. Крім того, наночастинки беруть участь у формуванні

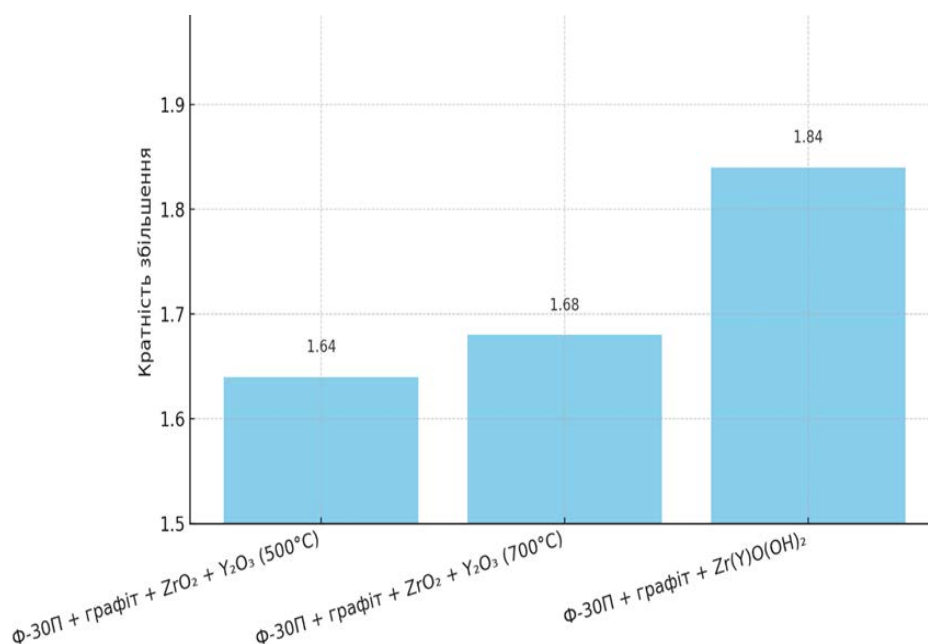


Рис. 2. Збільшення еластичності тришарового фторопластового покриття

Таблиця 1

Властивості промислового та модифікованого фторполімеру

Показник	Без модифікаторів	З модифікаторами (ZrO ₂ , графіт, аеросил)	Зміна
Мікротвердість (ум.од.)	1.0	2.8–3.4	Зростає у 3.4 рази
Опір подряпинам	5.02	14.35	Зростає у 2.8 рази
Еластичність	Середня	Вища	Зростає
Теплопровідність	Висока	Помірна	Зменшується
Термостійкість	До 200°C	До 230–235°C	Зростає
Зносостійкість	Низька	Висока	Значно зростає
Адгезія до металу	Посередня	Висока	Зростає

міцного захисного шару з високою стійкістю до контактних деформацій і поліпшеною адгезією плівки переносу до поверхні контртіла, що обумовлено їхньою координативною активністю.

Таким чином, узагальнюючі властивості застосування промислового фторполімеру Ф-30П та модифікованого, можливо навести таблично (табл. 1).

Запропоновані фторполімерні покриття дозволяють збільшити термін служби не лише технологічного обладнання, а й виробів, що використовуються для протезування та імплантації. Це, своєю чергою, сприяє підвищенню їх довговічності.

Висновки. Полімерні матеріали відіграють дедалі важливішу роль у сучасній медицині, забезпечуючи ефективні рішення для імплантології та протезування.

Проведені дослідження довели, що фторполімерні покриття на основі фторопласту Ф-30П, модифіковані наночастинками цирконію та графіту, демонструють суттєве покращення фізико-механічних характеристик:

1. Найбільше підвищення стійкості до подряпин (у 14,35 разів) спостерігалось при введенні 2% аморфного гідроксиду цирконію, легovanого ітрієм. Так, стійкість до пошкодження шкрябанням збільшилась для тришарових фторопластових покриттів до складу зовнішнього шару якого

входять: а) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % ZrO₂ + 3% Y₂O₃ (500 °C) у 5,02 разів, б) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % ZrO₂ + 3% Y₂O₃ (700 °C) у 8,98 разів, в) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легovanого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): Zr(Y)O(OH)₂ у 14,35 разів в порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П.

2. Покращення абразивостійкості (до 1,38 разів), еластичності (до 1,84 разів), мікротвердості (до 3,4 рази) і термостійкості (до 235°C).

3. Оптимальна концентрація нанодобавок у межах 1–3 мас. % сприяє утворенню рівномірно розподіленої армованої структури з високою щільністю пакування.

4. Модифікатори також забезпечують утворення стабільного захисного шару з високою адгезією та зносостійкістю.

Таким чином, модифіковані фторполімерні покриття перспективні для застосування у медичних імплантах і технологічному обладнанні завдяки значному підвищенню довговічності та експлуатаційних властивостей.

Список літератури:

1. Moore M. J., Tan R. P., Yang N., Rnjak-Kovacina J., Wise S. G. Bioengineering artificial blood vessels from natural materials. *Trends in biotechnology*. 2022. Pp. 693–707. DOI: 10.1016/j.tibtech.2021.11.003.
2. Yuan P., Chen M., Lu X., Yang H., Wang L., Bai T., Zhou W. Application of advanced surface modification techniques in titanium-based implants: latest strategies for enhanced antibacterial properties and osseointegration. *Journal of Materials Chemistry*. 2024. Vol. 12. DOI: 10.1039/D4TB01714E.
3. Bin L., Liang M., Yiwa L., Xuecheng P. Titanium Alloys for Biomedical Applications: A Review on Additive Manufacturing Process and Surface Modification Technology. *JOJ Material Science*. 2024. Vol. 8, No. 5. DOI: 10.19080/JOJMS.2024.08.555746.
4. Zhang H., Wu Z., Wang Z., Yan X., Duan X., Sun H. Advanced surface modification techniques for titanium implants: a review of osteogenic and antibacterial strategies Biomaterials. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2025. No 13. DOI: 10.3389/fbioe.2025.1549439.
5. Opia et al. Tribological properties enhancement through organic carbon nanotubes as nanoparticle additives in boundary lubrication conditions. *Jurnal Tribologi*. 2020. No. 27. Pp.116–131. Scopus.
6. Opia A. C., Abdollah M. F. B., Hamid M. K. A., Veza I. A review on bio-lubricants as an alternative green product: tribological performance, mechanism, challenges and future opportunities. *Tribology Online*. 2023. Vol.18, No. 2. Pp.18–33. DOI: 10.2474/trol.18.18. Scopus.

7. Owuna F.J. et al. Chemical modification of vegetable oils for the production of biolubricants using trimethylolpropane: A review. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2020. Vol. 29, No. 1. Pp. 75–82. DOI: 10.1016/j.ejpe.2019.11.004.
8. Lin W., Klein J. Recent progress in cartilage lubrication. *Advanced Materials*. 2023. Vol. 33, No. 18. Article 2005513. DOI: 10.48550/arXiv.2311.02681.
9. Raut H.K., Das R., Liu Z., Liu X., Ramakrishna S. Biocompatibility of Biomaterials for Tissue Regeneration or Replacement. *Biotechnol J*. 2020. Vol.15, No. 12. DOI 10.1002/biot.202000160.
10. Al-Shalawi F. D. et al. Biomaterials as Implants in the Orthopedic Field for Regenerative Medicine: Metal versus Synthetic Polymers. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 12. DOI: 10.3390/polym15122601.
11. Teo A. J. T. et al. Polymeric Biomaterials for Medical Implants and Devices. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2016. Vol. 2, No. 4. Pp. 454–472. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.5b00429.
12. Ardelean L. C. et al. Advances in Dentures: Novel Polymeric Materials and Manufacturing Technologies. In *Advances in Dentures—Prosthetic Solutions, Materials and Technologies*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.113936.
13. Олександренко В., Свідерський В., Кириченко Л., Даніленко І., Єфіменко В., Нелюбін Ю. Дослідження властивостей наномодифікованих покриттів на основі фторполімеру Ф-30П. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. Т. 329, № 6. С. 125–134. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-329-6-125-379
14. Actual problems of modern science. Monograph: edited by Matiukh S., Musial J., Polishchuk O., Macko M. Bydgoszcz, *Kazimierz Wielki University*. 2024. 1078 p. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/16382> (дата звернення: 01.08.2025).

Yefymenko V.V., Oleksandrenko V.P., Kustovska A.D., Rudenko V.M., Matveeva O.L., Trofimov I.L.
POLYMERIC MATERIALS IN THE TECHNOLOGIES OF IMPLANT AND PROSTHESIS MANUFACTURING

The article is devoted to the pressing issue of using polymeric materials in the production of implants and prostheses, with a particular focus on fluoropolymer coatings for titanium components. The authors explore the prospects and challenges of applying polymers in modern bioengineering, especially in orthopedics and implantology, where titanium alloys remain dominant. Despite titanium's high mechanical strength and biocompatibility, its wear resistance is limited, necessitating the development of innovative surface coatings.

The study highlights the advantages of fluoropolymers – materials with extremely low friction coefficients and outstanding chemical resistance – while acknowledging their key limitation: poor adhesion to metal substrates. To address this, the authors propose using three-layer fluoropolymer coatings based on F-30P, modified with zirconium oxide nanoparticles, graphite, and aminoorganosilicon compounds.

Experimental findings indicate that the introduction of $Zr(Y)O(OH)_2$ nanoparticles significantly improves the coatings' adhesion, wear resistance, elasticity, and microhardness. The best performance was achieved with 2 wt.% modifiers: scratch resistance increased by 14.35 times, microhardness by 3.4 times, and thermal resistance up to 235 °C. The article explains the mechanisms behind these improvements, such as the formation of spherulitic structures, interfacial frameworks, and protective films at the "polymer-metal" interface.

The article also provides a classification of medical polymers by origin, biodegradability, and biocompatibility, comparing natural and synthetic types. Considerable attention is given to biomimetic lubricant s– polymer-based nanofluids – that reduce friction in artificial joints. Current research directions include bioactive coatings, smart materials, and nanocomposites.

The study concludes that modified fluoropolymer coatings substantially enhance the durability and functionality of implants, reduce operational risks, and present promising opportunities for further development of functional polymeric materials in medicine.

Key words: *medical devices, high-molecular compounds, polymeric materials, fluoropolymer coatings, properties, adhesion, wear resistance, technological factors.*

Дата надходження статті: 02.09.2025

Дата прийняття статті: 22.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Іщенко О.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Москаль Р.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

БІОРОЗКЛАДНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ КРОХМАЛЮ

У статті розглянуто актуальну проблему забруднення довкілля відходами традиційних полімерів, які характеризуються надзвичайною стійкістю до біологічного розкладу та становлять глобальну екологічну загрозу. Визначено сучасні тенденції переходу до біорозкладних матеріалів, зокрема на основі відновлюваної сировини – крохмалю. Проведено аналіз наукових публікацій, що стосуються методів модифікації нативного крохмалю, його пластифікації та використання у складі композиційних матеріалів. Показано, що крохмаль є доступним, екологічним і перспективним біополімером, який після пластифікації перетворюється на термопластичний крохмаль (TPS), придатний для екструзії та лиття. Окрему увагу приділено ролі пластифікаторів (гліцерин, сорбіт, сечовина, формамід, етаноламін) та ко-пластифікації у покращенні фізико-механічних властивостей TPS і зниженні схильності до ретроградації. Розглянуто шляхи підвищення гідрофобності та водостійкості крохмальних біополімерів за рахунок хімічної модифікації, використання лимонної кислоти, нанонаповнювачів (целюлозні волокна, наноглина), а також введення біоактивних агентів (екстракт кавової гущі, протеїни, природні барвники). Наведені приклади свідчать про значний потенціал крохмалю для створення біопакувальних плівок із антибактеріальними, антиоксидантними та бар'єрними властивостями, що продовжують термін зберігання харчових продуктів та є повністю біорозкладними. Зроблено висновок, що Україна, як аграрна держава з розвинутою сировинною базою для виробництва крохмалю, має всі передумови для масштабування таких технологій на вітчизняних полімерних підприємствах. Це дозволить не лише зменшити екологічне навантаження та вирішити проблему накопичення пластикових відходів, але й сприятиме розвитку локального виробництва, імпортозаміщенню та інтеграції у світову біоекономіку.

Ключові слова: біорозкладні матеріали, крохмаль, пластикові відходи, термопластичний крохмаль.

Постановка проблеми. Проблема забруднення довкілля нерозкладними пластиками. Зростання попиту на біорозкладні матеріали.

Однією з найбільш актуальних екологічних проблем сьогодення є зростання обсягів виробництва та накопичення у довкіллі пластикових відходів [1]. Традиційні пластики, такі як поліетилен, поліпропілен і полістирол, є стійкими до біологічного розкладу, що призводить до їх тривалого існування в природі [2]. За оцінками, термін їхнього розкладу може сягати сотень, а подекуди й тисяч років, створюючи серйозну загрозу для екосистем, зокрема для світового океану, ґрунтів та дикої природи.

Ця проблема вимагає пошуку ефективних та екологічно безпечних альтернатив. Внаслідок цього, у сучасному світі спостерігається значне зростання попиту на біорозкладні матеріали, що здатні руйнуватися під дією мікроорганізмів

і природних факторів, повертаючись у біологічний цикл [3].

Перехід до біорозкладних матеріалів не лише сприяє зменшенню обсягів пластикових відходів на звалищах і в природі, але й є важливим кроком на шляху до циркулярної економіки та сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З моменту виникнення міст накопичення та утилізації твердих відходів (ТПВ) стали серйозною проблемою. У сучасному світі, де упаковка є найпомітнішим видом відходів, ця проблема набуває глобальних масштабів. В Україні, за даними, на звалищах накопичені десятки мільйонів тонн ТПВ [4].

Захоронення ТПВ – є найпоширеніший методом утилізації відходів в Україні – близько 90% відходів вивозиться на сміттєзвалища. Цей під-

хід є неефективним і екологічно небезпечним, оскільки кожне сміттєзвалище займає від 6 до 50 гектарів родючих земель, виводячи їх з корисного використання. Крім того, неконтрольоване захоронення призводить до забруднення ґрунтів і ґрунтових вод токсичними речовинами, що утворюється в процесі розкладання відходів [5].

Спалювання відходів розглядається як альтернатива для запобігання росту сміттєзвалищ. Однак, цей метод є дорогим і технологічно складним, оскільки потребує установок з ефективними фільтрами для очищення димових газів. Незважаючи на це, спалювання все ще супроводжується викидами шкідливих продуктів, зокрема токсичних солей важких металів, які згодом осідають на ґрунті та у воді, забруднюючи навколишнє середовище і створюючи загрозу для здоров'я людини [1].

Найбільш раціональним та екологічно виправданим шляхом є утилізація вторинної полімерної сировини (ВПС). Цей підхід дозволяє зменшити навантаження на довкілля, зберігати природні ресурси і перетворювати відходи на цінні матеріали. Ключовим етапом у цьому процесі є сортування відходів, що спрощує подальшу переробку. Для цього важливою є організація збору і сортування ВПС, а також застосування екологічного маркування. В Європейському Союзі поступово запроваджується уніфікована система екомаркування, що допомагає споживачам і переробним підприємствам ідентифікувати матеріали для подальшої переробки.

Таким чином, постійне зростання обсягів пластикових відходів, що не розкладаються, стимулює інноваційні дослідження у галузі біорозкладних технологій пакування, які перебувають у центрі уваги провідних світових наукових центрів та великих корпорацій. Проте, однією з головних перешкод для їхнього масового впровадження є висока вартість біодеградабельних матеріалів, яка наразі значно перевищує вартість традиційних пластиків [6].

Вирішення проблеми високої вартості біоупаковки вимагає комплексного підходу. В Україні це може бути досягнуто за допомогою економічного стимулювання, а саме – запровадження податкових пільг для підприємств, що займаються виробництвом біорозкладного пакування. Це дозволить знизити собівартість продукції та зробити її конкурентоспроможною.

Необхідно проводити інформаційні кампанії для бізнесу та населення щодо переваг біопакування, правил сортування та утилізації. Це допоможе подолати бар'єр високої вартості та збіль-

шити попит на екологічну продукцію. У країнах з розвинутою економікою використання біодеградабельної упаковки є індикатором відповідального бізнесу, що підтримується споживачами.

Одним із найперспективніших напрямків у розробці біорозкладних полімерів є створення матеріалів на основі термопластичного крохмалю (TPS). Наукові дослідження зосереджені на модифікації крохмалю з метою покращення його фізико-механічних та бар'єрних властивостей. Додавання пластифікаторів, таких як гліцерин і сорбіт, дозволяє перетворювати крохмаль на термопластичний матеріал, придатний для екструзії та лиття [7, 8].

Дослідники активно працюють над хімічною модифікацією крохмалю для підвищення його гідрофобності та стійкості до вологи. Це критично важливо для пакувальних матеріалів, що контактують з харчовими продуктами [9].

Розробка композитних матеріалів на основі крохмалю з додаванням нановолокон целюлози, наноглини та інших біонаповнювачів дозволяє значно підвищити міцність, жорсткість і бар'єрні властивості кінцевого продукту [10].

Метою статті є систематизація знань про крохмаль як основу для біополімерів, аналіз методів його модифікації та властивостей отриманих матеріалів, а також визначення ключових напрямків досліджень.

Виклад основного матеріалу. Біополімери на основі крохмалю, PLA, PHA, PBS, PBAT, PTT – набувають дедалі ширшого розповсюдження як сталі рішення. Крохмаль вирізняється низкою важливих переваг: він доступний, недорогий, біорозкладний, нетоксичний, легко функціоналізується і має відновлюване походження.

Крохмаль – це природний біополімер, який отримують із рослинних джерел, таких як кукурудза, картопля, пшениця та тапіока та є важливою складовою харчових продуктів. У процесі клітинного дихання він розщеплюється до глюкози й забезпечує організм енергією [11]. Крохмаль широко застосовується не лише у харчовій промисловості, а й у виробництві полімерів, паперу, текстилю, засобів для обробки білизни та біопалива [12].

Нативний крохмаль є крихким матеріалом і, відповідно, не підходить для технічних застосувань. Його структура зумовлена великою кількістю внутрішньо- та міжмолекулярних водневих зв'язків між гідроксильними групами, що істотно обмежує рухливість полімерних ланцюгів і сприяє утворенню кристалічних доменів. Для надання йому

еластичності та термопластичності необхідне введення відповідного пластифікатора [13].

При пластифікації крохмаль перетворюється на однорідну полімерну фазу, завдяки руйнуванню водневих зв'язків між ланцюгами. Це призводить до втрати кристалічності та зниження температури склування, що суттєво покращує гнучкість. Результатом є термопластичний крохмаль (TPS), який легко формується та обробляється [14].

Найпоширенішим пластифікатором є гліцерин, завдяки його нетоксичності, доступності, низькій вартості та високій температурі кипіння. Властивості TPS суттєво залежать від типу та концентрації пластифікатора [15].

Згідно з літературою, для приготування TPS можна застосовувати не лише нативний крохмаль, але й його модифіковані форми. Наприклад, діальдегідний крохмаль (DAS), отриманий шляхом використання періодату та гліцерину. У такому випадку руйнується кристалічність, підвищуються міцність, водостійкість та бар'єрні властивості, а ретроградація значно гальмується, порівняно з TPS із нативного крохмалю [16].

Також досліджено альтернативні пластифікатори, зокрема амідні сполуки – сечовина, формамід і етаноламін. Вони стабілізують TPS завдяки можливості формування міцніших водневих зв'язків із гідроксилами крохмалю, аніж гліцерин. При цьому затримується процес ретроградації, покращуються механічні й термічні властивості матеріалу [17].

Особливий інтерес становить ко-пластифікація сечовиною (15%) та етаноламіном (15%) при одержанні TPS екструзією утворює міцніші водневі зв'язки та однорідну аморфну фазу. Такий TPS має кращу термостабільність, механічні властивості (наприклад: міцність на розрив $\sim 9,0$ МПа, подовження до розриву $\sim 34,4\%$, енергія руйнування $\sim 1,34$ Н·м) і значно знижує ретроградацію, порівняно з TPS із гліцерином [18].

Крім того, дослідження 2021 року демонструє, що система з гліцерином і сечовиною (TPS, отриманий при двошнекової екструзії) показує покращену ефективність пластифікації, вищу термостабільність і зниження ретроградації, в порівнянні з TPS лише на гліцерині [19].

За даними огляду останніх досліджень і публікацій, термопластичний крохмаль (TPS) є поширеним типом біопластику, на нього припадає близько 50% світового ринку біопластиків. У Європі, який є лідером за впровадженням біопластичних рішень, маркетингові дослідження свідчать, що ринок біопластиків на основі крохмалю становить понад

40% від загальноєвропейського ринку біопластичних виробів. Це свідчить про значний попит та масштабне застосування крохмалю як ключового компоненту в біопластиках.

Розроблено технологія біорозкладних пакувальних плівок для харчових продуктів на основі крохмалю/полівінілового спирту/лимонної кислоти/карбоксицелюлози. Отримати плівки характеризуються високою міцністю (до ~ 56 МПа), водостійкими та газо-бар'єрними властивостями, а також антибактеріальною активністю, це досягнуто шляхом утворення водневих зв'язків та зшивання естерифікацією лимонної кислоти простим та екологічним методом, що дозволяє уникнути використання пластифікаторів, шкідливих для здоров'я людини. Такі плівки зберігають фрукти (лічі, сливи) до 4–14 днів і повністю деградують у ґрунті за ~ 30 діб [20].

У складі крохмаль/полівініловий спирт із додаванням лимонної кислоти досягають підвищення міцності і зменшення набухання матеріалу, завдяки функціоналу карбоксильних груп, що сприяє утворенню ефірних мостів [21].

В [22] дослідженні автори розробили біоактивні пакувальні плівки з полівінілового спирту/крохмалю були виготовлені шляхом додавання комбінованих антиоксидантних агентів, а саме екстрагованої кавової гущі та лимонної кислоти. Плівка, що включала 30 мас.% лимонної кислоти, показала мінімальну інгібуючу концентрацію проти *Escherichia coli* (*E. coli*) та *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*). Включення кавової гущі та лимонної кислоти в плівку показало синергетичний ефект щодо антибактеріальної активності. Водостійкість та кінетична сорбція вологи покращилися з додаванням лимонної кислоти. Міцність на розрив та біорозкладність зразків були в діапазоні 5,63–7,44 МПа та 65,28–86,64% відповідно. На основі цього дослідження плівка може бути застосована як новий матеріал для пакування харчових продуктів.

Крім того, додавання целюлози, зокрема целюлозних волокон із залишків рисової соломи, у суміш крохмаль/PVA зі гліцерином значно підвищує сумісність матриці, механічні характеристики підвищилися на 52% та знижує проникність для водяної пари [23].

Додавання целюлозних нанокристалів (CNC) та нановолокон (CNF) у термопластичний крохмаль (TPS) у концентрації 1–30 мас.% сприяє підвищенню міцності на розрив та модуля пружності. Цей ефект зумовлений однорідною дисперсією наповнювача та формуванням міцних водне-

вих зв'язків між його молекулами та полімерною матрицею, що забезпечує армуючу дію. Водночас зменшення відсотка подовження при розриві пояснюється сильними міжфазними взаємодіями, які обмежують рухливість полімерних ланцюгів у системі «CNC–TPS». За відсутності належної взаємодії між нанонаповнювачем і матрицею спостерігається слабка передача напружень та швидке поширення тріщин.

Окремо досліджувалося використання нанокристалів целюлози, отриманих кислотним гідролізом конопель, у матриці горохового крохмалю з гліцерином. Було встановлено, що введення 0–30 мас. % CNC зумовлює суттєве варіювання механічних характеристик: міцність на розрив підвищувалася від 3,9 до 11,5 МПа, модуль пружності – від 31,9 до 823,9 МПа, тоді як подовження при розриві зменшувалося від 68,2 до 7,5% [24].

Введення органічно-модифікованих монтморилонітів (MMT) та наночастинок SiO_2 у термопластичний крохмаль (TPS) істотно підвищує його фізико-механічні та бар'єрні властивості. Оптимальний ефект досягається при концентрації 3–5% MMT, що забезпечує зростання міцності на розрив та зниження проникності для водяної пари завдяки «лабіринтовому ефекту» шаруватих структур. Додавання наночастинок SiO_2 у кількості до 5% також сприяє підвищенню механічної міцності та зниженню вологостійкості. Таким чином, комбіноване використання MMT і SiO_2 є ефективною стратегією для створення функціональних біополімерних плівок із покращеними експлуатаційними характеристиками [25].

З огляду на те, що Україна є аграрною державою з потужною сировинною базою для одержання крохмалю та інших природних полімерів, розвиток технологій з виробництва біорозкладних матеріалів на основі крохмалю виглядає цілком

перспективним і реалістичним. Аналіз сучасних літературних джерел демонструє значний потенціал використання крохмалю для створення біополімерних плівок та композитів із покращеними фізико-механічними й бар'єрними властивостями. Впровадження таких технологій на вітчизняних полімерних виробництвах може не лише сприяти імпортозаміщенню та зміцненню економічної стійкості країни, але й забезпечити суттєве зменшення антропогенного навантаження на довкілля.

Такі технології можна реалізувати без великих капітальних витрат на нове обладнання – процес сумісний з існуючими екструзійними чи литтєвими лініями на вітчизняних підприємствах. У поточній складній ситуації для України це виглядає як перспективний напрям розвитку локального виробництва біорозкладних матеріалів харчового призначення.

Висновки. Систематизація сучасних наукових даних свідчить, що крохмаль – є перспективна та відновлювальна сировина для створення біополімерів. Різноманітні методи його фізичної, хімічної та біотехнологічної модифікації дозволяють отримувати матеріали з покращеними механічними, бар'єрними та біодеградаційними властивостями, що відкриває широкі можливості для застосування в пакувальній, медичній, харчовій та фармацевтичній галузях. Аналіз літератури засвідчує, що ключовими напрямками подальших досліджень це підвищення вологостійкості термопластичного крохмалю, створення композицій на основі крохмалю із іншими біополімерами, додавання біоактивних добавок, а також масштабування технологій для промислового впровадження. У контексті розвитку біоекономіки та зростаючих екологічних викликів ці напрями є стратегічно важливими для формування стійких і екологічно безпечних технологій майбутнього.

Список літератури:

1. Власенко І. В., Постова В. В. Аналіз сучасних інноваційних методів утилізації відходів. *Економіка і організація управління*. 2020. № 3. С. 30–40. URL: <https://doi.org/10.31558/2307-2318.2020.3.3>
2. Михайлова Є.О. Пластикове забруднення – одна з головних екологічних проблем людства. Комунальне господарство міст. *Серія: «Економічні науки»*. 2020. 4(157), 109–121. DOI 10.33042/2522-1809-2020-4-157-109-121
3. State of art review on sustainable biodegradable polymers with a market overview for sustainability packaging / S. K. Verma et al. *Materials Today Sustainability*. 2024. P. 100776. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100776>
4. Луців Н. Г., Капраль А. Р. Впровадження інноваційних технологій переробки твердих побутових відходів в Україні. *Електронний журнал "Ефективна економіка"*. 2024. № 12. URL: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.12.64>
5. Колодійчук, І. А. (2023). Техніко-технологічний потенціал утилізації відходів у регіонах України / О.В. В кн. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України* : Вип. 161 (3) (с. 34–40). DOI: <https://doi.org/10.36818/2071-4653-2023-3-5>

6. Bioplastic for future: A review then and now / Manali Shah et al. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2021. Vol. 9, no. 2. P. 056–067. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.9.2.0054>
7. Dang K. M., Yoksan R. Thermoplastic starch blown films with improved mechanical and barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. Vol. 188. P. 290–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.027>
8. Effect of different proportions of glycerol and D-mannitol as plasticizer on the properties of extruded corn starch / X. Xu et al. *Frontiers in Nutrition*. 2024. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1335812> (date of access: 04.09.2025).
9. Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: A review / X. Wang et al. *Carbohydrate Polymers*. 2020. Vol. 240. P. 116292. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116292>
10. Green composites based on thermoplastic starch reinforced with micro- and nano-cellulose by melt blending – A review / F. A. Cataño et al. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 248. P. 125939. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125939>
11. Adak S., Banerjee R. A green approach for starch modification: Esterification by lipase and novel imidazolium surfactant. *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 150. P. 359–368. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.038>
12. Starch Based Bio-Plastics: The Future of Sustainable Packaging / Ravindra V. Gadhave, Abhijit Das, Prakash A. Mahanwar, Pradeep T. Gadekar. *Open Journal of Polymer Chemistry*. 2018. Vol. 08, no. 02. P. 21–33. URL: <https://doi.org/10.4236/ojpcchem.2018.82003>
13. Development of Starch-Based Materials Using Current Modification Techniques and Their Applications: A Review / Amaraweera, S. M., Gunathilake, C., Gunawardene, O. H. P., Fernando, N. M. L., Wanninayaka, D. B., Dassanayake, R. S., Rajapaksha, S. M., Manamperi, A., Fernando, C. A. N., Kulatunga, A. K., Manipura, A. *Molecules*. 2021. Vol. 26, no. 22. P. 6880. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26226880>
14. Alissandratos A., Halling P. J. Enzymatic acylation of starch. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 115. P. 41–47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.030>
15. Cuevas-Carballo Z. B., Duarte-Aranda S., Canché-Escamilla G. Properties and Biodegradation of Thermoplastic Starch Obtained from Grafted Starches with Poly(lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*. 2019. Vol. 27, no. 11. P. 2607–2617. URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01540-w>
16. Effect of dialdehyde starch on cassava starch/poly(vinyl alcohol) blends fabricated by melt mixing method with glycerol plasticized / Y. Wang, H Ma, S. Ying, J. Gao, X. Zhou, *Journal of Applied Polymer Science*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/app.55932>
17. Muncke J. Tackling the toxics in plastics packaging. *PLOS Biology*. 2021. Vol. 19, no. 3. P. e3000961. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000961>
18. Ma X.F., Yu J.G., Wan J.J. Urea and ethanolamine as a mixed plasticizer for thermoplastic starch. *Carbohydrate Polymers*. 2006. Vol. 64, no. 2. P. 267–273. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.11.042>
19. Structural and Thermal Properties of Starch Plasticized with Glycerol/Urea Mixture / M. Paluch, J. Ostrowska, P. Tyński. *Journal of Polymers and the Environment*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02235-x>
20. Transparent, mechanically robust and antibacterial food packaging film based on starch/PVA/citric acid/carboxycellulose nanofibers by one-pot green process / X. Yuan, F. Wei, Wang, Z., Li, X., Deng, Y., X. Shi, B. Lin, *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 302. P. 140573. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140573>
21. Physico-chemical properties of biodegradable films of polyvinyl alcohol/sago starch for food packaging / F. F. Hilmi M. U. Wahit, N. A. Shukri, Z. Ghazali, A. Z. Zanuri, *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 16. P. 1819–1824. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.056>
22. Polyvinyl Alcohol (PVA)/Starch Bioactive Packaging Film Enriched with Antioxidants from Spent Coffee Ground and Citric Acid / A. Ounkaew, P. Kasemsiri, K. Kamwilaisak, *Journal of Polymers and the Environment*. 2018. Vol. 26, no. 9. P. 3762–3772. URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1254-z>
23. Cao X., Chen Y., Chang P.R., Stumborg M., Huneault M.A. Green composites reinforced with hemp nanocrystals in plasticized starch. *J. Appl. Polym. Sci.* 2008;109:3804–3810. doi: 10.1002/app.28418.
24. Iwata T. Biodegradable and Bio-Based Polymers: Future Prospects of Eco-Friendly Plastics. *Angewandte Chemie International Edition*. 2015. Vol. 54, № 11. P. 3210–3215. URL: <https://doi.org/10.1002/anie.201410770>
25. Frangopoulos T., Marinopoulou A., Goulas A., Likotraftiti E., Rhoades J., Petridis D., Kannidou E., Stamelos A., Theodoridou M., Arampatzidou A., Tosounidou A., Tsekmes L., Tsihlikakis K., Gkikas G., Tourasanidis E., Karageorgiou V. Optimizing the Functional Properties of Starch-Based Biodegradable Films. *Foods*. 2023 Jul 24; 12(14):2812. doi: 10.3390/foods12142812.

Ishchenko O.V., Moskal R.M. BIODEGRADABLE POLYMER MATERIALS BASED ON STARCH

The article discusses the pressing issue of environmental pollution caused by traditional polymer waste, which is highly resistant to biological decomposition and poses a global environmental threat. Current trends in the transition to biodegradable materials, particularly those based on renewable raw materials such as starch, are identified. An analysis of scientific publications on modifying native starch, its plasticisation, and use in composite materials. It is shown that starch is an affordable, environmentally friendly, and promising biopolymer, which, after plasticisation, is converted into thermoplastic starch (TPS), suitable for extrusion and moulding. Particular attention is paid to the role of plasticisers (glycerol, sorbitol, urea, formamide, ethanolamine) and co-plasticisation in improving TPS's physical and mechanical properties and reducing its susceptibility to retrogradation. Ways to increase the hydrophobicity and water resistance of starch biopolymers through chemical modification, the use of citric acid, nanofillers (cellulose fibres, nanoclay), and the introduction of bioactive agents (coffee grounds extract, proteins, natural dyes) are considered. The examples demonstrate the significant potential of starch for creating biopackaging films with antibacterial, antioxidant, and barrier properties that extend the shelf life of food products and are entirely biodegradable. It is concluded that Ukraine, an agrarian country with a developed raw material base for starch production, has all the prerequisites for scaling up such technologies at domestic polymer enterprises. This will not only reduce the environmental impact and solve the problem of plastic waste accumulation, but also contribute to the development of local production, import substitution, and integration into the global bioeconomy.

Key words: biodegradable materials, starch, plastic waste, thermoplastic starch.

Дата надходження статті: 28.08.2025

Дата прийняття статті: 19.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 628.16
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/25>

Кучук М.С.

Дніпровський державний технічний університет

Кравченко О.В.

Дніпровський державний технічний університет

Іванченко А.В.

Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А.Л.

Дніпровський державний технічний університет

ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕРІВНОВАЖНОЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПЛАЗМИ

У роботі представлено результати експериментального дослідження ефективності знезараження питної та стічної води за допомогою нерівноважної низькотемпературної плазми. Досліди проводилися на лабораторній плазмовій установці при тиску 0,05–0,1 атмосфер, силі струму 100–150 мА та напрузі 500–1500 В. В основі роботи – визначення впливу нерівноважної низькотемпературної плазми на різні групи бактерій, зокрема, сальмонели, лактозопозитивні кишкові палички, ентерококи та клостридії, які є показниками санітарно-епідемічної безпеки води. Для моделювання реальних умов питну воду штучно контамінували бактеріями в концентрації від 10^3 до 10^6 клітин/мл, а стічні води досліджували як у вихідному вигляді, так і з додаванням патогенних культур *Salmonella infantis* та *S. derby*.

Встановлено, що при впливі плазми протягом 4–6 хв у питній воді досягався повний бактерицидний ефект щодо лактозопозитивних кишкових паличок, грамнегативних бактерій та сальмонел, тоді як спорові форми клостридій зберігали життєздатність, знижуючись лише на 1–2 порядки. Встановлено, що сальмонели гинули вже через 2–3 хв впливу, що свідчить про високу ефективність технології для знешкодження патогенів. У випадку стічних вод також відзначалося значне зниження чисельності лактозопозитивних кишкових паличок, ентерококів і загального мікробного числа на 4 хвилині обробки, однак спорові бактерії залишалися найбільш стійкими.

Дослідження підтвердило перспективність використання нерівноважної низькотемпературної плазми для знезараження води, оскільки метод забезпечує швидке знищення основних епідеміологічно значущих бактерій, включно із сальмонелами, і може застосовуватися як альтернатива традиційним технологіям (хлорування, озонування, ультрафіолетове опромінення). Водночас, отримані результати вказують на необхідність оптимізації режимів роботи плазмових реакторів, зокрема підвищення сили струму та використання плівкових режимів протікання, що дозволить зменшити час обробки та підвищити ефективність щодо спороутворювальних форм мікроорганізмів.

Таким чином, метод нерівноважної низькотемпературної плазми має значний потенціал для впровадження у системи підготовки питної води та попередньої обробки стічних вод, забезпечуючи високий рівень знезараження без утворення токсичних побічних продуктів, характерних для хлорування.

Ключові слова: низькотемпературна плазма, бактерії, знезараження, питна вода, міські стоки, бактерицидний ефект.

Постановка проблеми. Очищення води є критично важливим для здоров'я людини та стабільності екосистем. Хоча існуючі методи знезараження, такі як хлорування та озонування, ефективні, вони мають певні недоліки, що вимагає пошуку нових, досконаліших підходів.

Хлорування, яке є найпоширенішим методом, може призводити до утворення тригалометанів, які є канцерогенними сполуками. Нові методи, що не використовують хлор, можуть мінімізувати ці ризики, забезпечуючи безпечнішу питну воду. Багато сучасних технологій, наприклад,

УФ-зnezараження, потребують значних витрат енергії. Розробка нових, енергоефективних методів є ключовим для зменшення екологічних наслідків та забезпечення стійкого водопостачання в майбутньому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існують різні методи зnezараження патогенів у водному середовищі, серед яких найпоширенішими є хлорування та використання його сполук, озонування, ультрафіолетове опромінення, а також поєднання цих способів [1].

Хлорування є найпоширенішим способом зnezараження питної води, проте утворення токсичних побічних продуктів стимулювало пошук альтернатив.

Одним із варіантів стала електрохімічна дезінфекція, зокрема безхлорні системи з новими плівками [2]. Попри ефективність, такі методи мають недоліки: високу вартість, короткочасний ефект (потребують комбінування), можливе утворення шкідливих сполук та ризики для здоров'я при перевищенні допустимих концентрацій.

У роботі [3] розглянуто питання переходу від рідкого хлору до застосування натрій гіпохлориту у процесі зnezараження питної води. Проаналізовано переваги й недоліки різних дезінфекційних засобів, придатних для цієї стадії водопідготовки. Особливу увагу приділено негативним аспектам використання рідкого хлору: небезпеці під час дозування, транспортування та зберігання, а також утворенню хлорорганічних сполук, серед яких переважають тригалометани (зокрема хлороформ), що характеризуються вираженим мутагенним і канцерогенним впливом. Запропоновано удосконалення існуючої технологічної схеми з метою зменшення кількості побічних продуктів хлорування та покращення органолептичних показників питної води [3].

З'ясовано [4], що використання світлодіодного УФ-випромінювання може слугувати альтернативним способом зnezараження питної води в польових умовах. Результативність і безпечність такого методу зnezараження визначається низкою чинників: товщиною шару води та її якістю, інтенсивністю та тривалістю впливу УФ-випромінювання, гідродинамічними параметрами, матеріалами й конструкцією обладнання, а також наявністю стабільного джерела живлення та можливістю його підзарядки.

Нова Директива Ради Європейського Союзу (Directive (EU) 2020/2184) щодо якості питної води встановлює вимогу, щоб вода, призначена для споживання людиною, не містила мікроор-

ганізмів, паразитів і речовин, здатних становити потенційну загрозу для здоров'я [5].

Запропоновано [6] принципово нову концепцію забезпечення населення України якісною питною водою, яка базується на використанні автономних комплексів для очищення води безпосередньо в місцях її споживання. Розроблено комплекси водопідготовки індивідуального та колективного призначення, оснащені системами біотестування та аналітичного контролю якості води. Вибір методів очищення водопровідної та іншої води до рівня безпечної здійснюється відповідно до її складу і реалізується на основі блочного принципу, що дає можливість варіювати кількість блоків залежно від характеристик вихідної води. Запропоновані технології та обладнання не мають світових аналогів за собівартістю та комплексністю вирішення завдань. В Україні вже впроваджено понад тисячу блочних установок типу «Вега» та зnezаражувальних апаратів «Промінь» у населених пунктах усіх регіонів країни.

Передові окиснювальні процеси активно вивчаються для очищення води від хімічних і біологічних забруднень. Деякі з них уже комерціалізовані, зокрема озонування та ультрафіолетова обробка. Для підвищення ефективності плазмових технологій досліджують конструктивні параметри реакторів і фізичні чинники, що впливають на очищення. Основою плазмової обробки є використання високоактивних гідроксильних радикалів, які окиснюють забруднювачі та запобігають утворенню нових шкідливих сполук [7].

Одним із перспективних альтернативних методів водоочищення є застосування плазмового розряду електричного струму. У процесі розрядів виникає широкий спектр фізико-хімічних ефектів, зокрема утворюється потужне електричне поле, інтенсивне ультрафіолетове випромінювання, ударні хвилі надлишкового тиску, а також формуються високоактивні хімічні сполуки, такі як радикали ($\text{OH}\cdot$, $\text{H}\cdot$, $\text{O}\cdot$) та молекули (H_2O_2 , H_2 , O_2 , O_3) [8]. Низькотемпературна плазма здатна ефективно усувати забруднювальні речовини й мікроорганізми, покращуючи якість води за рахунок активності хімічних реакцій, розкладання органічних сполук і стерилізації.

У дослідженні [9] продемонстровано результативність використання контактної нерівноважної низькотемпературної плазми (ННТП) для обробки води та водних розчинів NaCl , AgNO_3 , AgCl з метою одержання продуктів із вираженими дезінфікуючими властивостями. Визначено оптимальні умови плазмохімічного синтезу дезін-

фекційних сполук у водному середовищі. Також вивчено антагоністичний вплив отриманих сполук на низку мікроорганізмів (*Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus saprophibicus*, *Staphylococcus epidermidis*, *E. coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans* та ін.) у порівнянні з традиційними дезінфікуючими засобами [9].

Відомі дослідження із застосування нерівноважної низькотемпературної плазми для обробки поверхневих вод для побутового використання. У роботі [10] показано, що використання нерівноважної низькотемпературної плазми було ефективним методом знищення бактерій у воді значно з одночасним усуненням запаху, при цьому електропровідність водних розчинів підвищилася.

Таким чином, нерівноважна низькотемпературна плазма є перспективним методом знезараження води, оскільки забезпечує ефективне знищення патогенних мікроорганізмів без утворення шкідливих побічних продуктів. Вона діє завдяки активним формам кисню та нітрогену, має екологічну безпечність, енергоефективність і може застосовуватись для очищення як питної, так і стічної води.

Мета статті – встановити особливості процесу знезараження води із використанням нерівноважної низькотемпературної плазми.

Виклад основного матеріалу. Експериментальне дослідження ефективності знезараження води за допомогою нерівноважної низькотемпературної плазми (ННТП) проводили на лабораторній установці з такими параметрами: тиск 0,05–0,1 атмосфер, сила струму 100–150 мА, напруга 500–1500 В. В основі експерименту ставилася задача оцінити, як впливає ННТП на різні види бактерій, зокрема сальмонели, лактозопозитивні кишкові палички (ЛКП), а також клостридії та ентерококи, у питній та стічній воді.

Для дослідження питної води її штучно забруднювали культурами бактерій (від 10^3 до 10^6 клітин/мл), що імітувало реальні умови. Час впливу плазми варіювався від 1 до 15 хвилин. Особливу увагу приділяли споровим формам бактерій (клостридіям), які є стійкими до несприятливих умов. Для отримання спор культуру клостридій попередньо нагрівали до 70 °C протягом 20 хвилин, що знищувало вегетативні форми, але зберігало спори. Для оцінки ефективності використовувалися такі бактеріологічні показники: загальне мікробне число (ЗМЧ); лактозопозитивні кишкові палички (ЛКП); клостридії; ентерококи; сальмонели. Для аналізу води використовували різні живильні середовища, зокрема: м'ясопептонний

агар (для ЗМЧ); середовище Ендо (для ЛКП, бактерії групи кишкової палички (БГКП), грамнегативної мікрофлори); середовище Вільсона-Блера (для клостридій).

Експерименти з міськими стічними водами проводили з використанням дехлорованої питної води з додаванням 0,1% або 1% стічної рідини з міської каналізації та чистої стічної рідини, в яку додавали патогенні бактерії сальмонели (*S. infantis*, *S. derby*).

Вихідні концентрації сальмонел визначали на вісмут-сульфітному агарі або в магнієвому бульйоні. Всі інші бактерії (ЗМЧ, ЛКП, тощо) у стічній воді аналізували без попереднього додавання, а також досліджували стійкі ентерококи на середовищі Сланца-Бертілі. Через добу інкубації посівів у термостаті при 37 °C проводили підрахунок колоній ЗМЧ, ідентифікацію та облік решти мікрофлори.

Для визначення біохімічної активності культур, виділених з води, використовували диференціальне середовище Клігера. За потреби (для сальмонел насамперед) проводили серологічну діагностику “підозрілих” культур.

Проведено дві серії експериментів із знезараження водопровідної води. Як відомо, основним показником епідемічної безпеки питної води, що визначається Державним стандартом України, є бактерії групи кишкових паличок. При вихідній концентрації цих бактерій в 1 мл від 10^3 до 10^6 повний бактерицидний ефект отримано при 4, 5 і 6 хвилинах впливу нерівноважної низькотемпературної плазми. Практично ті ж результати отримані для ЛКП та грамнегативних бактерій.

Загальне мікробне число за всіх перевірених термінів впливу відзначалося зростання одиничних колоній. Патогенні кишкові бактерії сальмонели, що знаходилися в питній воді в кількості одиниць, десятків і сотень мікробних клітин в 1 мл, гинули через 2 хвилини. Кількість клостридій знижувалася на 1–2 порядки, але, як і за всіх загальноприйнятих видів знезараження води (хлорування, озонування, ультрафіолетове опромінення тощо), крім спеціальних способів для особливих умов, повного бактерицидного ефекту не було відзначено.

На рисунку 1 представлено динаміку загибелі бактерій при різних експозиціях нерівноважної низькотемпературної плазми. Як видно з рисунку, через 3–5 хв впливу настає загибель практично всіх індикаторних груп бактерій у питній воді (ЛКП, БГКП, грамнегативних мікроорганізмів), крім спорових форм клостридій, які практично не ушкоджуються та зберігаються у воді, вегетативні форми при цьому знижуються на два порядки.

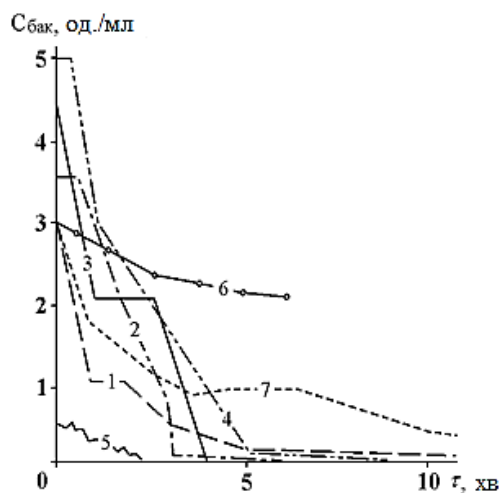


Рис. 1. Динаміка загибелі бактерій у питній воді під впливом нерівноважної низькотемпературної плазми: 1 – загальне мікробне число; 2 – лактозопозитивні кишкові палички; 3 – бактерії групи кишкової палички; 4 – грамнегативні мікроорганізми; 5 – сальмонели; 6 – спорові форми клостридій; 7 – вегетативні форми клостридій

Сальмонели, які відносяться до патогенних бактерій знешкоджувались протягом 2–3 хв впливу нерівноважної низькотемпературної плазми. Отже, обробка питної води даним методом протягом 4, 5 та 6 хв сприяє забезпеченню стандартної якості питної води.

Вивчення знезаражувального ефекту при обробці стічних вод щодо зазначених вище бактерій також проводили у двох серіях експериментів.

Для оцінки якості стічних вод з відкритих водойм використовували показник лактозопозитивних кишкових паличок. Як в експериментах з питною водою, так і стічною, спостерігалось невелике зниження кількості спорових форм клостридій і більш значне – ентерококів, але їх повна загибель не відзначалася.

Як впливає з рисунку 2, на якому представлена динаміка загибелі бактерій при дії нерівноважної низькотемпературної плазми на стічні води, на 4-й хвилині впливу розряду різко знижується кількість ЛКП – основного бактеріального показника епідеміобезпеки стічних вод. Такий самий ефект був відзначений і в розчинах із сальмонелами. Активне зниження спостерігається для ЗМЧ та ентерококів. Найбільш стабільні рівні зберігали спорові бактерії – клостридії.

Стерилізуючий ефект по відношенню до сальмонел спостерігали при обробці проб, що відповідають за забруднення якості води поверхневих водойм – при часі обробки 4 хв; міської стічної

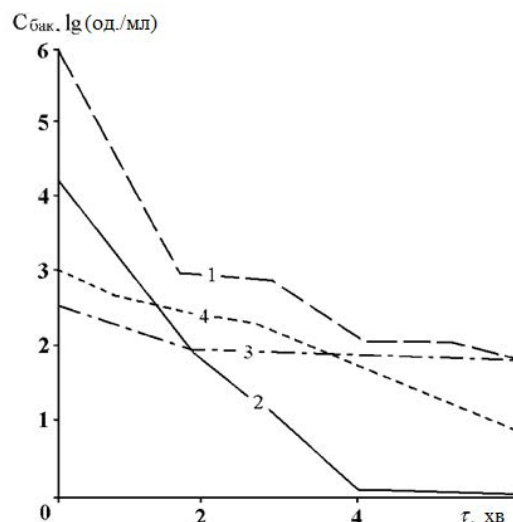


Рис. 2. Динаміка загибелі бактерій у стічній воді під впливом нерівноважної низькотемпературної плазми: 1 – загальне мікробне число; 2 – лактозопозитивні кишкові палички; 3 – клостридій; 4 – ентерококи

рідини (при концентрації сальмонел 5000 мікробних клітин/мл) – при ідентичній тривалості знезараження.

Слід зазначити, що отримані в ході досліджень обмеження тимчасового інтервалу знезараження вод не є кінцевими. При збільшенні сили струму, що протікає між анодом і оброблюваним розчином, та застосування плівкового режиму протікання рідини час обробки можна суттєво знизити. Останнє можна реалізувати із застосуванням реакторів вертикального типу з розгорнутим розрядом нерівноважної низькотемпературної плазми.

Висновки. Таким чином, узагальнюючи результати проведених досліджень з гігієнічної оцінки ефективності знезараження питних і стічних вод під впливом нерівноважної низькотемпературної плазми, можна зробити висновок, що питна вода, що містить бактеріальне забруднення на реально можливому рівні, при її обробці 4 хв відповідає ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» та ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості». Стічна вода після обробки нерівноважною низькотемпературною плазмою протягом 4–5 хвилин досягає нормативного рівня бактеріальної безпеки. При вихідній концентрації лактозопозитивних кишкових паличок від 10^3 до 10^6 клітин/мл, повне знезараження досягалося через 4–6 хвилин обробки, при цьому сальмонели гинули вже через 2 хвилини. Загальне мікробне число знижувалося, але повністю не зникало.

Спорові форми клостридій виявилися стійкими до обробки плазмою, їх кількість практично не змінювалася. Загалом, 3–5 хвилин впливу нерів-

новажної низькотемпературної плазми достатньо для загибелі більшості індикаторних бактерій у питній воді, за винятком спор клостридій.

Список літератури:

1. Бабієнко В. В., Мокієнко А. В. Вода та інфекції. Патогени та їх інактивація: монографія. Одеса: Прес-кур'єр. 2023. 584 с.
2. Martinez-Huitle, C.A. and Brillas, E. Electrochemical Alternatives for Drinking Water Disinfection. *Angewandte Chemie International Edition*. 2008. № 47, 1998–2005. <https://doi.org/10.1002/anie.200703621>
3. Груздева О. В., Позднякова У. О., Голуб В. В. Оцінка ефективності процесу знезараження питної води хлорвмісними сполуками в умовах міськводоканалу. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. Vol. 32. No. 1. P. 171–182. doi: 10.15421/jchemtech.v32i1.29157
4. Верголяс М.Р., Іванко О. М., Маврикін Ю.О. Аналіз використання УФ-випромінювання для дезінфекції питної води в надзвичайних ситуаціях. *Український журнал військової медицини*. 2023. № 4 (4). P. 26–32. [https://doi.org/10.46847/ujmm.2023.4\(4\)-026](https://doi.org/10.46847/ujmm.2023.4(4)-026)
5. Бабієнко В.В., Мокієнко А.В. Оцінка ризику в мікробіології води Якість води: біомедичні, технологічні, агропромислові і екологічні аспекти: Збірник матеріалів II Міжнародної науково-технічної конференції. (Тернопіль 24–25 травня 2023 року) / М-во освіти і науки України, Терн. Націон. Техн. Ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. С. 18–19.
6. Гончарук В.В., Байдачний А.М., Кучерук Д. Д., Балакіна М.М. Новітні технології й устаткування для отримання високоякісної питної води. *Наука та інновації*. 2015. Т. 11. № 1. С. 86–91.
7. Gunnar R. Stratton, Christopher L. Bellona, Fei Dai, Thomas M. Holsen, Selma Mededovic Thagard Plasma-based water treatment: Conception and application of a new general principle for reactor design. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 2015, № 273. P. 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.059>
8. Чарний Д.В., Ярошук Д.А., Пугач О.В. та ін. Знезараження питної води за допомогою плазми електричного розряду. *Геохімія техногенезу*. 2021. № 34. С. 99–104.
9. Скиба М. І., Півоваров, О. А., Макарова, А. К., Воробйова, В. І., Гнатко, О.М. Плазмохімічно оброблена вода та водні розчини для знезараження питної води. *Технічні науки та технології*. 2017. №3(5). С. 240–246.
10. Dung Van Nguyen, Phong Quoc Ho, Toan Van Pham, Tuyen Van Nguyen, Lavane Kim Treatment of surface water using cold plasma for domestic water supply. *Environ. Eng. Res.* 2019. № 24(3). P. 412–417 <https://doi.org/10.4491/eer.2018.215>

Kuchuk M.S., Kravchenko O.V., Ivanchenko A.V., Kovalenko A.L. WATER DISINFECTION USING NON-EQUILIBRIUM LOW-TEMPERATURE PLASMA

The work presents the results of an experimental study of the effectiveness of disinfection of drinking and wastewater with the help of non -equilibrium low -temperature plasma. The experiments were performed on a laboratory plasma at a pressure of 0.05–0.1 atmospheres, a current of 100–150 mA and a voltage of 500–1500 V. The basis is to determine the impact of non -equilibrium low -temperature plasma on different groups sanitary and epidemic safety of water. For modeling of real conditions, drinking water was artificially contaminated with bacteria in a concentration of 10^3 to 10^6 cells/ml, and wastewater was investigated both in the original form and with the addition of pathogenic crops Salmonella Infantis and S. Derbi.

It was found that when exposed to plasma for 4-6 minutes, a complete bactericidal effect on lactose -positive Escherichia coli, gram-negative bacteria and salmonella was achieved in drinking water; while spore forms of clostridia maintained viability, decreasing by only 1-2 orders of orders. It is established that salmonella died after 2-3 minutes of exposure, which indicates the high efficiency of technology for the neutralization of pathogens. In the case of wastewater; there was a significant decrease in the number of lactose-positive Escherichia coli, enterococci and a total microbial number in 4 minutes of treatment, but spore bacteria remained the most stable. The study confirmed the prospect of using non -equilibrium -temperature plasma for water disinfection, since the method provides rapid destruction of major epidemiologically significant bacteria, including salmonella, and can be used as an alternative to traditional technologies (chlorination, ozonation, ultraviolet). At the same time, the results obtained indicate the need to optimize the modes of operation of plasma reactors, in particular increasing current and use of film modes of leakage, which will reduce the time of processing and increase the efficiency of sporeing forms of microorganisms.

Thus, the method of non-equilibrium low-temperature plasma has considerable potential for the introduction into the system of preparation of drinking water and pre -treatment of wastewater; providing a high level of disinfection without the formation of toxic side products characteristic of chlorination.

Key words: low-temperature plasma, bacteria, decontamination, drinking water, urban drains, bactericidal effect.

Дата надходження статті: 21.09.2025

Дата прийняття статті: 11.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

UDC 678.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/26>

Myronyuk O.V.

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Naumchyk A.O.

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Baklan D.V.

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Linyucheva O.V.

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Sikorsky O.O.

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DEVELOPMENT OF CORN STALK- AND COCONUT SHELL-BASED FILLERS AND THEIR UTILIZATION IN POLYLACTIDE COMPOSITES

The transition from petroleum-based polymers to biological alternatives is one of the key strategies for reducing carbon footprint and dependence on fossil resources. A literature review has shown that although polylactide (PLA) is a commercially available and widely studied biopolymer, its use in water-based dispersion coatings remains limited due to the lack of suitable dispersion preparation methods and poor compatibility of polar cellulose fibers with the nonpolar PLA matrix. The article is devoted to the utilization of agricultural waste as fillers and shows that this approach is a sustainable way to improve PLA-based materials while solving the problem of waste disposal within the circular economy. The aim of the work was to develop aqueous PLA dispersion coatings reinforced with fibrous fillers obtained from corn stalks and coconut shells. The fillers were obtained by mechanical grinding, chemical pretreatment, and fractionation, followed by silane modification to improve hydrophobicity. Fibers with a size of 30-400 μm (average size $\sim 65 \mu\text{m}$ for corn, $\sim 150 \mu\text{m}$ for coconut) were obtained, which were incorporated into PLA dispersions stabilized with sodium polyacrylate and processed into films by spin coating. The morphology of the filler, surface chemistry, dispersion quality, and coating formation were evaluated using structural, spectroscopic, and microscopic methods. The results showed that silane treatment increased the water contact angle to 133° for corn fibers and 140° for coconut fibers, which corresponds to the Cassie-Baxter effect. IR spectroscopy results confirmed a decrease in the adsorbed water content. Uniform fiber distribution and complete particle fusion at 130°C were demonstrated. Studies showed that moisture absorption decreased from 3,61 wt. % to 2,81 wt. % ($\approx 30\%$) for corn-based composites and from 3,33 wt.% to 3,0 wt. % ($\approx 10\%$) for coconut-based composites, indicating improved water resistance and stronger interfacial interactions in the case of corn fibers. The possibility of producing fully bio-based coatings with low VOC content, reinforced with fibrous fillers obtained from agricultural waste, has been established. This approach has been shown to provide a platform for extending PLA dispersion technology to other agricultural wastes and alternative bio-based matrices, such as polyhydroxyalkanoates. Optimization is proposed, aimed at developing industrial formulations by incorporating plasticizers, pigments, stabilizers, and fully biocompatible surface modifiers to obtain scalable and durable bio-based coating systems.

Key words: cellulose, polymer, fibers, polylactide, composite, particles.

© Myronyuk O.V., Naumchyk A.O., Baklan D.V., Linyucheva O.V., Sikorsky O.O., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Formulation of the problem. One of the effective approaches to substantially reducing the carbon footprint and lowering the reliance on fossil fuels is the transition from petroleum-based polymers, which currently account for most polymeric materials produced worldwide, to bio-based alternatives. Among these, polylactide (PLA) is considered one of the most promising polymers, as it is not only extensively studied but also technologically developed and commercialized. Chemically, PLA is a polyester by nature. Being a thermoplastic, it can serve as a substitute for various polyolefins and polyesters in a wide range of applications, from 3D printing to packaging materials [1].

In recent years, PLA has found increasing use in various industrial applications. Nevertheless, its utilization as coating material remains relatively limited [2]. This is primarily because PLA is commonly processed into films from solution, a method that requires the use of volatile organic solvents. Dispersion-based systems of PLA, however, face certain challenges, as this polymer cannot be synthesized via emulsion or suspension polymerization techniques.

Research efforts have been directed toward the development of aqueous dispersions of PLA, which advance this material into the category of low-VOC systems and address the limitations associated with solvent-based PLA. Several studies have investigated the preparation of PLA aqueous dispersions using the solvent evaporation method. Researchers who proposed this method primarily focused on obtaining the dispersion itself and demonstrated only the feasibility of forming films from such dispersions. However, for fully functional coating material additional functional components are required [3].

As is well known, paint and coating formulations may contain up to seven to ten different functional components [4]. Among these, fillers are of particular importance, as they not only reduce the overall cost of the coating but also impart specific functional properties, such as reinforcement and improved mechanical strength. The primary film-forming material used in such coatings is PLA. The filler is also expected to meet the requirement of being bio-based and derived from renewable resources.

Fillers derived from agricultural waste are particularly suitable, as they contain no fossil-based carbon and consist exclusively of biogenic carbon. Moreover, their utilization contributes to the integration of such waste streams into the circular economy. Plant-derived materials are complex and structurally diverse, and the isolation of cellulose fibers from them presents a considerable challenge that must

be addressed depending on the specific type of raw material used. Furthermore, the surface of cellulose fibers is inherently hydrophilic, which may pose an additional obstacle to their effective integration into PLA matrix [5].

The primary objective of this study is the extraction of biofibers from agricultural waste and the subsequent enhancement of their compatibility with PLA-based matrices, particularly aqueous-dispersion systems.

Analysis of recent research and publications. PLA-based composites have found wide application across various industrial sectors and are most processed by extrusion. The products of such processing include filaments for 3D printing, packaging films, and a variety of other materials [6].

In most cases, the materials used are filled grades of PLA. The processing temperature, depending on the specific grade, typically ranges from 150–160 °C up to about 180 °C. These composites are commonly filled, and it would be unusual if they were not reinforced with natural fillers, such as ground wood flour, which is also regarded as a renewable resource [7]. However, it cannot be classified as an agricultural waste material.

In composites containing cellulose-based fillers, researchers have long noted the problem of non-uniform distribution of such particles within the polymer matrix. This issue primarily arises from the mismatch in polarity between the surface of the cellulose fibers and the polymer itself, as the latter is significantly less polar than the cellulose filler. This challenge can be addressed by introducing compatibilizing agents capable of forming interfacial bridges between the filler surface and the PLA matrix [8]. One such material is maleic anhydride, as well as grafted polymers produced using this technology.

When transitioning from extrusion techniques to water-dispersed coatings, an additional challenge arises: the primary medium in which the filler is dispersed is water, a highly polar solvent. Consequently, nonpolar particles tend to disperse poorly in such an environment. In this field, the issue is typically addressed by incorporating specialized surfactant-type dispersing agents, which reduce the effective surface polarity of the hydrophobized filler and thereby facilitate its dispersion in the aqueous medium [9].

As can be anticipated, this situation results in a highly multicomponent system with numerous potential issues. For example, if a considerable amount of dispersant remains in the cured coating, it may act as a site that attracts additional water during service, thereby

accelerating the degradation of the coating. In any case, the key criterion for the successful integration of cellulose-based fillers into polymer matrices – ranging from extrusion technology to latex coating systems – is the uniform distribution of particles within the matrix. Achieving this uniformity is the primary objective of the work presented in this study.

It should be noted that many studies focus on cellulose-based fillers derived from renewable resources, such as wood flour or cotton fibers. However, these materials are not agricultural waste. The reason lies in the fact that the primary raw materials are cleaner and more easily processed, whereas agricultural wastes are considerably more difficult to handle. Materials that require additional utilization hold a certain value, which makes this approach particularly promising. In our study, special attention is given to the use of agricultural residues such as corn stalks, which represent a widely available waste stream, including in Ukraine.

Corn stalks are characterized by a relatively regular structure of elementary cellulose formations, which makes them highly suitable candidates for use in PLA composites. Moreover, their utilization would enable the transfer of this experience into the broader global practice of producing fillers for PLA-based composites. A considerable number of studies have been devoted to the compounding of PLA, particularly for extrusion. Research has also been conducted on the preparation of PLA dispersions, as well as on the production and hydrophobization of fillers derived from corn residues and coconut waste. However, to date, there is no comprehensive study that describes the fabrication of films from aqueous dispersions incorporating bio-based fillers [10].

This opens the possibility of obtaining a new class of materials with virtually zero fossil carbon content, in which all components are bio-based, and the resulting coatings are entirely free of volatile organic compounds.

Task statement. The main objective of this study is the development of a novel material based on aqueous dispersions of PLA combined with bio-based fibrous fillers obtained through the valorization of agricultural waste. The specific objectives of this study are as follows: to obtain fibrous fillers from agricultural waste, namely corn stalks and coconut shells; to modify the surface energy of these fillers in order to reduce their surface polarity; to incorporate the prepared fibrous fillers into PLA-based compositions in the aqueous phase using dispersing agents; and to investigate the uniformity of fiber distribution within the PLA matrix.

Outline of the main material of the study. To obtain the fillers, the raw materials, namely agricultural waste such as corn stalks and coconut shells, were first subjected to size reduction. The corn stalks were simply cut into flakes approximately 1 mm in length, whereas the coconut shells were initially crushed in a jaw crusher and subsequently further reduced in a hammer mill once the particle size reached several millimeters.

The corn stalk sample was subsequently treated with a mixture of acetic acid and hydrogen peroxide in a 70:30 volume ratio for two hours at 95 °C, followed by cooling. It was then immersed in a 0,1 M potassium hydroxide solution for two days at room temperature, after which it was treated with hydrogen peroxide.

The fiber processing algorithm was the same for both materials. Both pretreated fibers, after being washed to remove residues of the reaction mixture, were passed through a colloidal mill FDM-Z-150 and then through a blender. Following this disintegration treatment, they were fractionated by a sieving (mesh) method under a flow of water. Thus, the working size range of the filler fractions was selected to be between 30 and 400 µm.

For the obtained cellulose fillers, which had been classified after milling and subsequently dried, a silane-based modifier was employed, namely polymethylhydrosiloxane (XIAMETER MHX-1107 Fluid 30 cSt, Dow Chemical). The fibers were mixed with a 1 wt. % solution of hydrophobizer in xylene and exposed for 3 hours, after which they were removed from the solution, washed, and dried at 135 °C to ensure the fixation of the siloxane on the surface of the cellulose fibers.

The PLA dispersions (based on 4060D PLA from Ingeo, USA) were synthesized according to the procedure previously described in our previous paper [11]. For blending with the fibers 0,5 wt. % sodium polyacrylate dispersant was added to the dispersion. The hydrophobized fibers were then introduced into this solution, where they became wetted and incorporated into the dispersion matrix.

The films were produced using the doctor blade method. A drop of the prepared material was applied to the surface and then spread through a gap of the desired thickness to form a uniform coating. The coating was subsequently dried at room temperature to remove moisture completely. Since the film formation temperature of PLA is relatively high (130 °C for the unmodified material) the obtained coating was further heated at 130 °C and held for a defined period to allow particle coalescence.

The quality of fiber surface treatment with silane was evaluated by measuring the water contact angle. For this purpose, the material was spread as a layer approximately 1 mm thick on a microscope glass slide. A flat surface was formed on top, onto which a droplet (5 μl) of water was deposited. The contact angle was recorded automatically using a tensiometer (BGD190, Bigued Precise Instruments, China).

The compositions were analyzed using infrared spectroscopy in the range of 4000–400 cm^{-1} (Specord IR75). For powders, the KBr pellet method was used, while for films, direct transmission measurements were performed.

The sintering of PLA particles, the composite uniformity, and fibers structure was examined using a Konus Academy optical microscope with UCMOS 1300 digital camera (Sigeta Optics) and ToupView software.

Fig. 1 shows that the processing of both corn stalks and coconut shells yields anisotropic, elongated fibers with the potential to serve as reinforcing agents. The corn-derived fibers are more diverse in both morphology and aspect ratio. They include not only relatively thin fibers but also cellulose plates resulting from the preparation process (Fig. 1, a). In the case of coconut, the fibers exhibit a more uniform width and a distinct aspect ratio (Fig. 1, b) with characteristic internal structure.

The fiber particle size distribution was determined by 300 particles analysis. The results indicate that the average particle size is approximately 65 μm for corn

fibers and 150 μm for coconut fibers. As shown by the granulometric curves, the distributions are uniform and monomodal (Fig. 2). For corn fibers, the minimum particle size in the sample was 30 μm (Fig. 2, a), whereas for coconut fibers it was 70 μm (Fig. 2, b). Accordingly, most of the fractions fall within the range of 30–150 μm for corn fibers and 70–300 μm for coconut fibers.



Fig. 1. Fibrous filler particles derived from: corn stalks (a); coconut shells (b)

Both materials consist predominantly of cellulose polymer, as confirmed by the presence of $-\text{OH}$ groups (Fig. 3, a, b), with stretching absorption bands in the range of 3000–3400 cm^{-1} and deformation vibrations near 1600 cm^{-1} . The spectra also clearly indicate the carbonaceous nature of the materials, as evidenced by C-H vibrations at 2900–2860 cm^{-1} . Hydrophobization (Fig. 3, c, d) does not significantly alter the overall spectral pattern of the materials. Only minor changes can be observed, such as the slight appearance of C-H related doublets and variations in the peak ratios associated with adsorbed water, as seen in the 1600 cm^{-1}

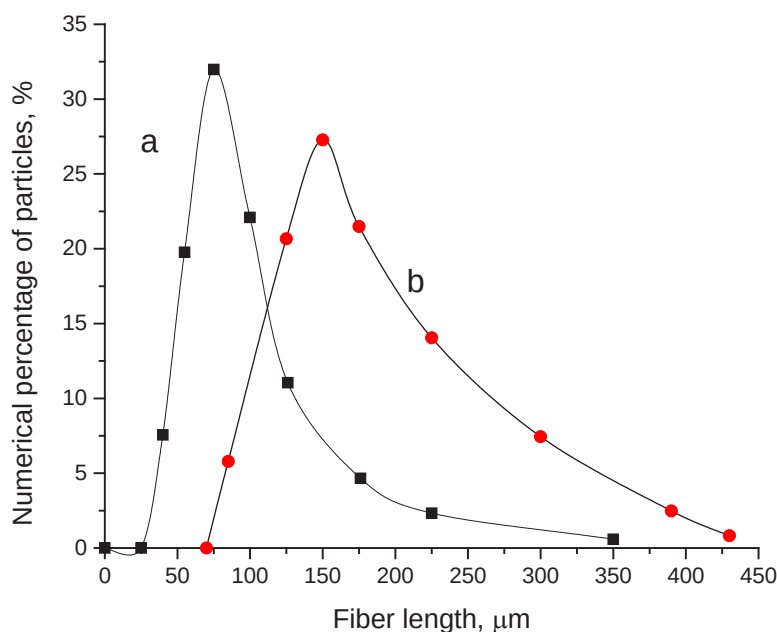


Fig. 2. Granulometry curves of particles derived from: corn stalks (a); coconut shells (b)

region indicating a reduced content of adsorbed water in the hydrophobized samples. Overall, the spectrum remains quite similar.

Hydrophobic treatment effectiveness is demonstrated on Fig. 4. The water droplet of hydrophobized corn fibers is 133° (Fig. 4, a), the contact angle of hydrophobized coconut fibers reaches 140° (Fig. 4, b). Such high contact angle values do not reflect the intrinsic wettability of the fiber surface alone. Rather, this effect arises from the porous capillary structure formed by the fibers, which enables the Cassie–Baxter state [12]. Nevertheless, these high contact angles are only attainable when the material itself possesses considerable inherent hydrophobicity ($95\text{--}100^\circ$) which fully corresponds to the hydrophobicity imparted by silane treatment.

During the film formation process, the mechanism of film development from dispersed particles was first investigated. As shown in Fig. 5, a, a microscopic image of films obtained by the solvent evaporation

method is presented. Fig. 5, b and Fig. 5, c illustrates intermediate stages of particle coalescence, which begin at 130°C and progress over time. Fig. 5, b corresponds to 30 seconds of exposure at this temperature, while Fig. 5, c corresponds to 3 minutes. Fig. 5, d shows an almost fully formed film with some residual porosity after 5 minutes of thermal treatment at 130°C . With further holding, a defect-free continuous film is obtained.

Fig. 6, a, b shows final versions of fully sintered films at 130°C containing fibers derived from corn stalks. The fibers are distributed almost uniformly across the entire coating without forming aggregates. This indicates that the affinity between the polymer matrix and the fibers is relatively high.

The composites obtained from PLA with fibers also confirm a strong interaction between the components (Fig. 7, a, b). Within the spectral region of $3700\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$, a characteristic doublet can be observed, consisting of two sharp peaks. This feature

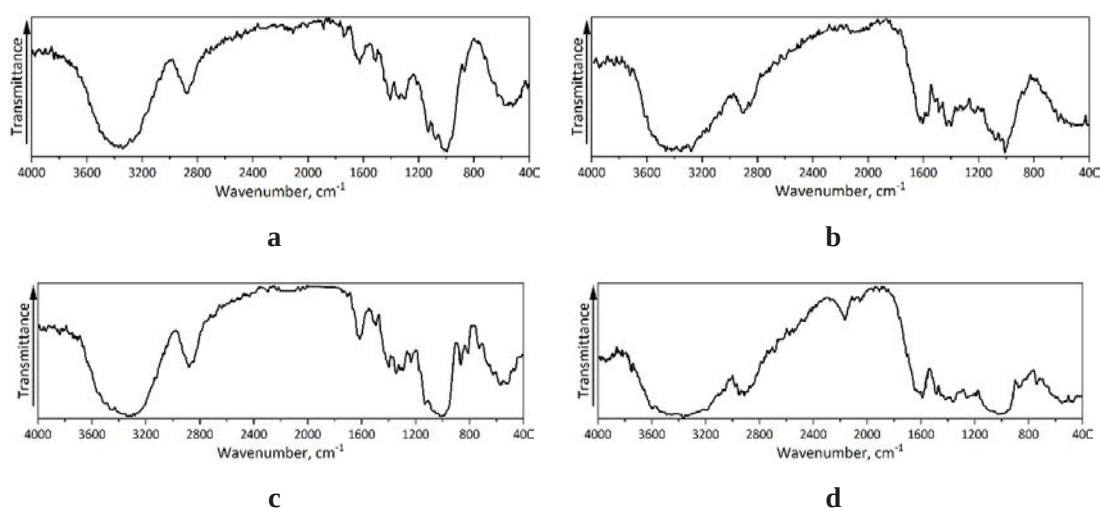


Fig. 3. Infrared spectra of fibers: pristine (a, b); hydrophobized (c, d); corn stalk (a, c); coconut shell (b, d)

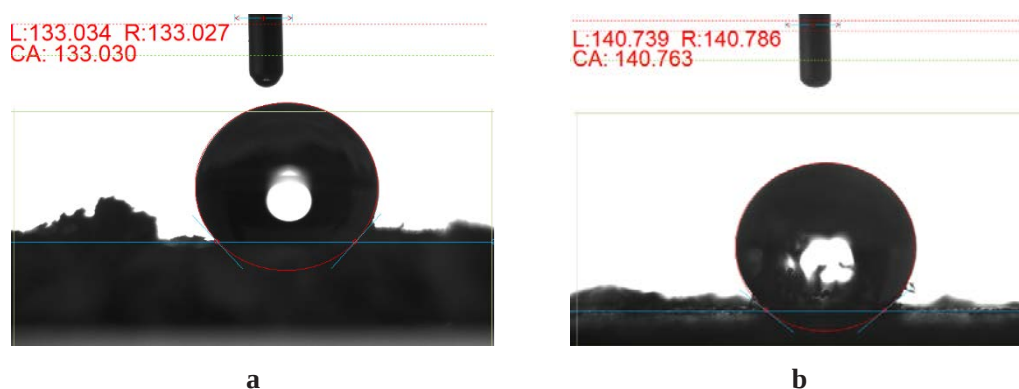


Fig. 4. Water contact angle on the surface of hydrophobized pressed layer of filler: corn stalk (a); coconut shell (b)

corresponds to OH groups located chemically on the fiber surface rather than OH groups of adsorbed water. This indicates that the presence of PLA reduces the adsorption capacity of the filler, which in turn reflects a relatively high level of interfacial interaction.

This effect is particularly evident in Table 1. For the coconut-based composite containing non-hydrophobized fibers, the material sorbs 3,33 wt. % of moisture from the air. Upon hydrophobization, this value decreases by about 10%, demonstrating a measurable improvement. By contrast, the effect is much more pronounced for corn-based fillers: the non-hydrophobized material sorbs 3,61 wt. % moisture, while the hydrophobized counterpart absorbs only 2,81 wt. %. In this case, the reduction in sorption is nearly 30%, which is a substantial improvement.

Table 1

Moisture absorption of the composites

№	Fiber type	Fiber content, wt. %	Hydrophobic treatment	Moisture uptake, wt. %
1	Coconut	20	-	3,33
2	Coconut	20	+	3,05
3	Corn	20	-	3,61
4	Corn	20	+	2,81

This phenomenon can be explained by comparing the granulometry of coconut and corn fibers (Fig. 2). Corn fibers contain a significant proportion of fine particles with higher specific surface area. The larger the specific surface area, the greater the number of

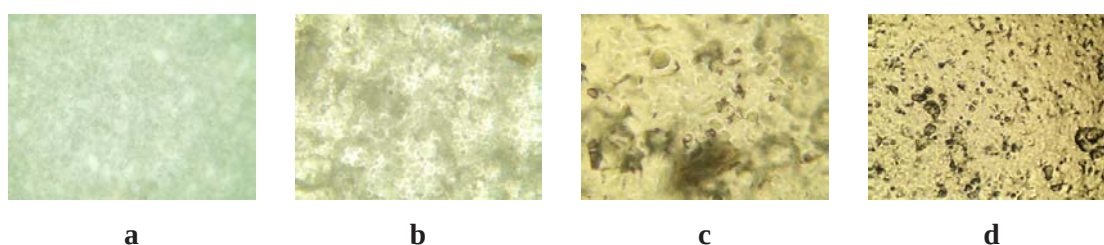


Fig. 5. Stages of PLA film sintering: pristine particles of PLA powder (a); sintering onset (30 s) (b); after 3 min (c); after 5 min of sintering (d)

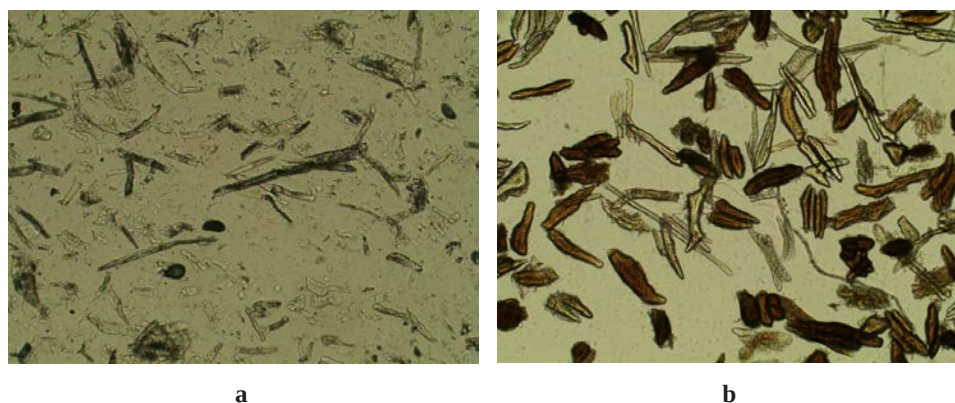


Fig. 6. Hydrophobized fiber distribution inside sintered PLA films: corn stalk (a); coconut shells (b)

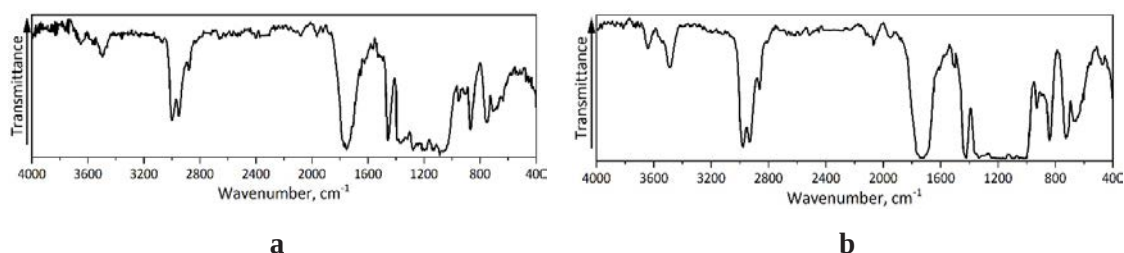


Fig. 7. Infrared spectroscopy of PLA composites with 20 wt. % filler: corn stalk (a); coconut fiber shell (b)

OH groups available for silane interaction, and consequently the higher the hydrophobization efficiency. Thus, for both coconut and corn fibers, hydrophobization proves to be an effective method for reducing moisture uptake, with particularly strong efficiency in the case of corn-based fillers.

The development of water-dispersion coatings based on PLA filled with plant-derived fillers from agricultural waste opens new prospects for utilizing a broad class of agricultural residues. These may include by-products from the processing of various fibers, such as flax or tow, as well as other agricultural fibers. Furthermore, the results of this work can be adapted to different types of fibers available in other regions, for example, banana stem residues. This approach may also prove valuable when extending the concept to alternative polymer matrices. In addition to PLA, polyhydroxyalkanoates (PHAs) may also be employed, and with the selection of an appropriate PHA, the same technological strategy could be replicated to obtain such coatings.

A promising direction for the further development of this technology lies in its refinement toward industrial-level coatings. Beyond fillers, other functional components must also be considered, such as plasticizers to reduce the glass transition temperature and facilitate film formation. Additional components could include pigments, additives to improve flow and leveling of the coating layer, as well as thickeners or dispersion stabilizers to ensure long-term stability.

Another promising avenue is to replace the surface treatment of such fillers with more bio-compatible agents, such as fatty acids or oxalates, thereby ensuring that the entire system remains fully bio-based. Moreover, this treatment could potentially be carried out in aqueous solutions rather than with organic solvents, as was done in the present work. Such modifications represent one of the prospective directions for the further advancement of this approach.

Conclusions. In this study, water-dispersion coatings based on PLA and bio-based fibrous fillers derived from agricultural waste (corn stalks and

coconut shells) were successfully obtained. The fillers were processed into fractions with particle sizes ranging from 30 to 400 μm , with average dimensions of ~ 65 μm for corn fibers and ~ 150 μm for coconut fibers. Microscopic observations confirmed their anisotropic morphology, enabling their use as reinforcing agents in PLA matrices.

Surface modification with silane significantly increased fiber hydrophobicity, as demonstrated by contact angle measurements of 133° for corn fibers and 140° for coconut fibers, attributed to the Cassie–Baxter effect. FTIR analysis indicated reduced adsorbed water content in the modified fibers and strong interfacial interactions with PLA. Composite films exhibited uniform fiber distribution and efficient particle coalescence at 130°C , resulting in continuous coatings.

Moisture absorption tests confirmed the effectiveness of hydrophobization: for coconut fibers, sorption decreased from 3.33 wt% to ~ 3.0 wt% (a 10% reduction), while for corn fibers it decreased from 3.61 wt% to 2.81 wt% (a 30% reduction). These results demonstrate that corn-based fillers, due to their finer granulometry and higher specific surface area, exhibit particularly strong improvements in moisture resistance.

The findings highlight the potential of converting agricultural residues into high-value functional fillers for bio-based PLA coatings. Future research should focus on extending this approach to other agricultural fibers (e.g., flax, banana stems), employing alternative bio-based matrices such as PHAs, and replacing silane modifiers with fully biocompatible agents like fatty acids or oxalates. Further development should also target industrial-level formulations through the inclusion of plasticizers, pigments, stabilizers, and other functional additives to achieve durable and scalable coating systems.

Funding. This research was funded by Ministry of Education and Science of Ukraine, agreement number PH/53-2024 (26.09.2024) (European Union aid instrument for fulfilling Ukraine's obligations in the Framework Program of the European Union for Scientific Research and Innovation "Horizon 2020).

Bibliography:

1. Balla E. et al. Poly(lactic Acid): A Versatile Biobased Polymer for the Future with Multifunctional Properties—From Monomer Synthesis, Polymerization Techniques and Molecular Weight Increase to PLA Applications. *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 11. P. 1822. URL: <https://doi.org/10.3390/polym13111822>.
2. Belletti G. et al. Morphology and Mechanical Properties of Poly(vinyl alcohol)/Poly(lactic acid) Blend Films Prepared from Aqueous Dispersions / *Macromolecular Materials and Engineering*. 2023. Vol. 309. P. 2300237. URL: <https://doi.org/10.1002/mame.202300237>.
3. Belletti G. et al. Preparations of Poly(lactic acid) Dispersions in Water for Coating Applications. *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 16. P. 2767. URL: <https://doi.org/10.3390/polym13162767>.
4. Buyondo A. K. et al. Integration of Fillers in Paint Formulation: Comprehensive Insights into Methods, Properties, and Performance. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. P. 105543. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105543>.

5. Rajeshkumar G. et al. Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites – A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 310. P. 127483. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127483>.
6. Wang X. et al. Research progress in polylactic acid processing for 3D printing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 112. P. 161–178. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.038>.
7. Periyasamy R. et al. A comprehensive review on natural fillers reinforced polymer composites using fused deposition modeling. *Polymer Composites*. 2023. Vol. 44, № 7. P. 3715–3747. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.27369>.
8. Ferri J. M. et al. Compatibilization and Characterization of Polylactide and Biopolyethylene Binary Blends by Non-Reactive and Reactive Compatibilization Approaches. *Polymers*. 2020. Vol. 12, № 6. P. 1344. URL: <https://doi.org/10.3390/polym12061344>.
9. Pilic B. et al. Hydrophobic silica nanoparticles as reinforcing filler for poly (lactic acid) polymer matrix. *Chemical Industry*. 2016. Vol. 70, № 1. P. 73–80. URL: <https://doi.org/10.2298/hemind150107015p>.
10. Buoso S. et al. Rheological Response of Polylactic Acid Dispersions in Water with Xanthan Gum. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7, № 15. P. 12536–12548. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05382>.
11. Myronyuk O. et al. Plasticized Polylactide Film Coating Formation from Redispersible Particles. *AppliedChem*. 2025. Vol. 5, № 3. P. 14. URL: <https://doi.org/10.3390/appliedchem5030014>.
12. McHale G., Ledesma-Aguilar R., Neto C. Cassie's Law Reformulated: Composite Surfaces from Superspreading to Superhydrophobic. *Langmuir*. 2023. Vol. 39, № 31. P. 11028–11035. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c01313>.

Миронюк О.В., Наумчик А.О., Баклан Д.В., Лінючева О.В., Сікорський О.О. РОЗРОБКА НАПОВНЮВАЧІВ НА ОСНОВІ КУКУРУДЗЯНИХ СТЕБЕЛ І КОКОСОВОЇ ШКАРАЛУПИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ПОЛІЛАКТИДНИХ КОМПОЗИТАХ

Перехід від полімерів на основі нафти до біологічних альтернатив є однією з ключових стратегій для зменшення вуглецевого сліду та залежності від викопних ресурсів. Літературний огляд показав, що полілактид (PLA) хоч і є комерційно доступним та широко дослідженим біополімером, але його застосування у водних дисперсійних покриттях залишається обмеженим через відсутність відповідних методів підготовки дисперсії та погану сумісність полярних целюлозних волокон з неполярною матрицею PLA. Стаття присвячена утилізації сільськогосподарських відходів як наповнювачів і показано, що даний підхід є стійким способом поліпшення матеріалів на основі PLA, одночасно вирішуючи проблему утилізації відходів в рамках циркулярної економіки. Метою роботи було розроблення водних дисперсійних покриттів PLA, армованих волокнистими наповнювачами, отриманими з кукурудзяних стебел і кокосової шкаралупи. Наповнювачі були отримані шляхом механічного подрібнення, хімічної попередньої обробки та фракціонування, з подальшою модифікацією силаном для поліпшення гідрофобності. Отримано волокна розміром 30–400 мкм (середній розмір ~65 мкм для кукурудзи, ~150 мкм для кокоса), які було включено в дисперсії PLA, стабілізовані поліакрилатом натрію, і перероблені в плівки методом ракельного розпилення. Оцінено морфологію наповнювача, хімію поверхні, якість дисперсії та формування покриття за допомогою структурних, спектроскопічних та мікроскопічних методів. Результати показали, що обробка силаном збільшила кут змочування водою до 133° для кукурудзяних волокон і 140° для кокосових волокон, що відповідає ефекту Кассі-Бакстера. Результати ГЧ спектроскопії підтвердили зменшення вмісту адсорбованої води. Продемонстровано рівномірний розподіл волокон і повне злиття частинок при 130 °C. Дослідження показали, що поглинання вологи зменшилося з 3,61 мас. % до 2,81 мас. % (~30%) для композитів на основі кукурудзи та з 3,33 мас. % до 3,0 мас. % (~10%) для композитів на основі кокоса, що свідчить про поліпшену водостійкість та сильніші міжфазні взаємодії у випадку кукурудзяних волокон. З'ясовано можливість виробництва повністю біооснованих покриттів з низьким вмістом ЛОС, армованих волокнистими наповнювачами, отриманими з сільськогосподарських відходів. Показано, що цей підхід забезпечує платформу для поширення технології диспергування PLA на інші сільськогосподарські відходи та альтернативні біоосновані матриці, такі як полігідроксиалканоати. Запропоновано оптимізацію, що спрямована на розробку промислових рецептур шляхом включення пластифікаторів, пігментів, стабілізаторів та повністю біосумісних модифікаторів поверхні для отримання масштабованих і довговічних біооснованих систем покриттів.

Ключові слова: целюлоза, полімер, волокна, полілактид, композит, частинки.

Дата надходження статті: 23.09.2025

Дата прийняття статті: 10.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

UDC 544.722.132

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/27>

Myronyuk O.V.

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Baklan D.V.

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Savchenko D.O.

V. Bakul Institute for Superhard Materials

Pashchenko E.A.

V. Bakul Institute for Superhard Materials

TUNING THE WETTING PROPERTIES OF LOW-DENSITY POLYETHYLENE FILMS VIA CHEMICAL OXIDATION AND STEARIC ACID MODIFICATION

Impregnated surfaces have recently become a promising class of materials that overcome the limitations of classic superhydrophobic coatings and demonstrate high stability and multifunctionality in such areas of application as anti-icing, water-repellent coatings, and barrier coatings. The problem of controlling the wettability of polyethylene as a typical polyolefin substrate is considered with the aim of developing a reproducible and environmentally compatible method for regulating its surface energy. A combined strategy was applied, which included the fabrication of a template using a femtosecond laser, thermo-pressing of polyethylene to obtain textured replicas, followed by chemical oxidation with nitric acid and potassium permanganate, and final hydrophobization with stearic acid as a biologically derived alternative to fluorinated modifiers. Surface morphology, oxidation effects, and wetting behavior were investigated using microscopy and contact angle measurements. It was shown that pure polyethylene has a water contact angle of $\sim 91^\circ$, which corresponds to its nonpolar and hydrophobic nature. Oxidation significantly reduced the contact angle to 28° due to surface polarization and possible deposition of manganese oxides, while further treatment with stearic acid restored and even exceeded the initial values, yielding $\sim 96^\circ$ on flat surfaces. The results showed that texturing increased the contact angle to 135° , and in combination with oxidation and hydrophobization to 145° , which is 54° higher than the untreated material. It was shown that the modified surfaces were resistant to wetting by liquids with low surface tension, with a critical surface energy of 55 mJ/m^2 , which is considered a high threshold for non-wettability. It has been established that the key mechanism of stable hydrophobization is the fixation of stearic acid molecules by polar groups introduced during oxidation, with the external orientation of hydrocarbon tails. The approach has been found to be reproducible and does not compromise the mechanical integrity of polyethylene. Prospects for further improvement include the introduction of metal nanoparticles to form secondary textures and their subsequent hydrophobization, which may contribute to the development of superhydrophobic and infused surfaces. The results highlight a scalable methodology to produce non-fluorinated, durable, and superhydrophobic polymer surfaces.

Key words: polymer, polyethylene, wetting, chemical treatment, surface modification, heat pressing, contact angle.

Formulation of the problem. Infused surfaces represent a novel class of materials that, on one hand, overcome the inherent limitations of the previous generation of materials – namely, water-repellent textured superhydrophobic surfaces in dynamic and

mechanical stability – and, on the other hand, provide highly effective performance in applications such as ice accretion mitigation, suppression of wetting by various liquids, and protection against liquid penetration into the underlying texture. This technology is

© Myronyuk O.V., Baklan D.V., Savchenko D.O., Pashchenko E.A., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

based on surfaces with a highly developed texture. Such substrates may be intrinsically porous, composed of interconnected fibers, or they may be artificially textured using various techniques, such as chemical etching or laser ablation. A critical requirement is that the structural pores must be capable of retaining the infused liquid within the texture [1].

The infused liquid is a crucial component of these materials, as it resides within the cavities formed by the elements of the surface structure and directly interfaces with the surrounding environment. When a droplet of a wetting liquid contacts such a surface, it essentially rests on the layer of the infused liquid rather than on the solid substrate. Consequently, during droplet removal, a portion of the infused liquid may also be displaced. Moreover, the polarity of the infused liquid significantly affects the spreading behavior of the wetting liquid on the surface and governs the specific amount of infused liquid retained within the pores, thereby determining the operational lifetime of the infused surface.

Consideration of the working mechanism of infused surfaces highlights the critical role of the affinity relationships between the porous substrate (serving as the scaffold for the infused liquid) and both the infused and wetting liquids. In scenarios where the infused liquid exhibits strong affinity to the substrate, while the wetting liquid does not, the system effectively repels the wetting liquid. In contrast, if either the infused liquid or the porous substrate shows substantial affinity toward the wetting liquid, wetting inevitably occurs. In the former case, the infused liquid may be gradually displaced and removed from the surface, whereas in the latter case, the wetting liquid can penetrate beneath the infused layer, leading to the breakdown of the system [2].

This fact underscores the relevance of investigating strategies to enhance the affinity between the infused liquid and the porous substrate in which it resides. The primary parameter that governs this affinity is the polarity or nonpolarity of both the liquid and the surface. In particular, the components of the surface tension of the infused liquid can be compared with the corresponding components of the surface energy of the solid substrate that constitutes the structural framework of the system.

For all substances, both surface energy and surface tension are determined by their chemical composition. However, this is not always the only parameter that must be considered in engineering design. For infused liquids, factors such as chemical composition, molecular weight, and the presence of impurities critically influence several technological aspects. First,

they determine the viscosity, which controls both the rate of liquid loss from the surface and the rate of self-replenishment of the infused layer. Second, the chemical composition governs the stability of the infused liquid under environmental exposure. Moreover, the chemical structure also defines the characteristic operational temperature range of the infused liquid, including its freezing point – a parameter of particular importance for anti-icing applications.

The most practical approach to controlling the affinity between the infused liquid and the substrate is to adjust the surface energy of the substrate itself. This can be achieved using a wide range of techniques and must be tailored individually for each specific type of substrate. Polymeric substrates – most notably polyethylene, which is among the most technologically convenient and economically viable materials for large-scale manufacturing – require specific approaches for tailoring their surface energy through surface modification [3].

The central problem of this study lies in controlling the wettability of polyethylene-based substrates as most promising and scalable materials for the base layer of infusion surfaces and elucidating the influence of surface texturing on this property.

Analysis of recent research and publications.

The fundamental concept of infused surfaces was first articulated in the pioneering works of Joanna Aizenberg, which were inspired by studies of natural organisms [4]. Carnivorous plants such as the pitcher plant served as a natural model, exemplifying the functional principle of infused surfaces. It is noteworthy that both in these pioneering studies and in most subsequent works, the infused surfaces and the infused liquids are typically composed of materials with inherently low surface energy and, consequently, low surface tension. In contrast, the liquids coming into contact with these surfaces usually exhibit comparatively high surface tension. One of the most common liquids that come into contact with infused surfaces is water or aqueous solutions. Water may be present in its normal liquid state, in a supercooled state, or occasionally as water vapor. However, in all reported cases of successful infused surface performance, a key factor remains the distinct difference in polarity between the infused liquid and the contacting (wetting) liquid. More practical types of infused liquids are those that combine sufficiently low surface tension with high stability under environmental stresses. For instance, when comparing aliphatic hydrocarbons with silicone-based liquids, the latter are generally more resistant to degradation by ultraviolet radiation or oxidative processes in the

presence of ozone, making them more suitable candidates for use as infused liquids. It is well known that the surface energy of polyolefins, in particular – polyethylene, is not the lowest among polymeric materials that could potentially be used as substrates. To further reduce their surface energy, a sequential strategy, that was reported in [5] for the polycarbonate substrate, was employed, beginning with controlled surface oxidation. In this approach, only the outermost layers of the material are subjected to oxidation, while the deeper layers – responsible for the bulk mechanical strength and appearance – remain unaffected. This oxidized surface layer becomes enriched with polar functional groups formed during the oxidation process. These groups are chemically reactive, which enables their use as anchoring sites for subsequent surface modifications, including hydrophobization treatments. One of the most widely used strategies for hydrophobizing oxidized polymer surfaces involves silanization. In this approach, organosilane molecules react with the polar functional groups introduced during the oxidation stage, forming covalent bonds and producing a thin siloxane-based layer on the surface. The organic moieties of the silanes can be tailored to provide hydrophobic or even low-surface-energy functionalities, thereby significantly reducing the overall surface energy of the substrate. Silanization is particularly attractive because it yields durable, conformal coatings and can be applied using relatively simple solution- or vapor-phase processes [6].

Another effective approach involves the deposition of fluorinated compounds or fluoropolymers, which impart extremely low surface energy due to the high electronegativity and low polarizability of fluorine atoms. Such coatings can be applied through various techniques, including plasma-enhanced deposition, dip-coating, or spray-coating of fluorinated precursors. Fluorinated layers provide not only enhanced hydrophobicity but also increased chemical and environmental resistance, making them suitable for long-term operation of infused surface systems.

Fluorinated organic compounds, although highly effective in reducing surface energy, are widely recognized as environmentally problematic and are often considered insufficiently sustainable. Therefore, replacing them with more environmentally compatible alternatives – even if slightly less efficient – represents a highly relevant research objective. In the present work, stearic acid was explored as a candidate for such replacement, serving as a hydrophobizing agent after the oxidation of polyethylene surfaces [7].

Increasing the surface polarity of polyethylene is a relatively straightforward and well-established task,

commonly employed, for example, in the production of printable packaging materials. In such cases, the enhancement of polarity is typically achieved using methods such as corona discharge or plasma treatment. However, the subsequent reverse hydrophobization of these surfaces, as well as the efficiency of such treatments, has been investigated only rarely. This represents an evident gap of knowledge that the present study aims to address.

Task statement. The aim of this work is to establish the possibility of flexibly controlling the wettability of textured polyolefin-based surfaces. To achieve this objective, the study addresses, in sequence, the tasks of surface texturing of polyethylene by thermopressing, enhancement of surface energy through oxidation, and subsequent modification with stearic acid to induce hydrophobization.

Outline of the main material of the study. The methodological approach of this study involved the fabrication of textured polyethylene surfaces, their subsequent oxidative treatment, hydrophobization in a stearic acid solution, and evaluation of their wettability.

To produce imprinted textures on polyethylene surfaces, a two-step procedure was employed. First, metallic templates were fabricated by creating periodic groove-like patterns on AISI304 stainless steel substrates using femtosecond laser ablation. These textured surfaces, as well as the regularities of their formation, were investigated and reported in our previous work [8].

To obtain negative replicas of the laser-textured surfaces, a solution-based method was used. 10 wt. % polycarbonate (Calibre 303 10 TNT, Dow Plastics) solutions in dichloromethane were prepared and cast onto the laser-textured steel templates, followed by solvent evaporation to form uniform thin films. These films were then mechanically peeled off from the metallic templates, resulting in negative replicas of the laser-fabricated microstructures.

Because the melting temperature of polycarbonate is significantly higher than that of LDPE, it can be used as a negative template for producing positive surface structures on polyethylene. This approach was employed in the present work: thermopressing was carried out at 120 °C, at which polyethylene melts and becomes sufficiently pliable to replicate the template features. The resulting polyethylene textures were subsequently used as substrates for the following stages of the study.

Chemical oxidation was performed using a mixture of potassium permanganate and nitric acid [9]. Solutions of each reagent were prepared at concentrations of 0.2 mol/l and volumes of 50 ml. Both textured and

non-textured polyethylene samples were immersed in this mixture overnight (approx. 10 hours). After treatment, their wettability was assessed using an optical microscope equipped with a goniometric stage.

The oxidized polyethylene samples were then subjected to hydrophobization in an isopropanol solution of stearic acid (1 wt. %) at 60 °C. The films were kept in the solution for two hours, then removed, cooled, rinsed with isopropanol to eliminate excess stearic acid, and finally dried. After drying, their wettability was evaluated.

The contact angles were measured using a Konus Academy optical microscope equipped with a goniometric stage and an UCMOS 1300 digital camera (Sigeta Optics). The measurements were performed in the TouView software, which enabled determination of the contact angle between the sample surface and the liquid droplet.

As shown in Fig. 1, the initial contact angle on the untreated polyethylene samples was relatively high, averaging around 91°. This value is consistent with previously reported literature data [10, 11] and confirms the well-established notion that polyethylene, and polyolefins in general, are inherently nonpolar and hydrophobic polymers.

Oxidation in the presence of strong oxidizing agents such as nitric acid and potassium permanganate led to a pronounced decrease in the contact angle on polyethylene surfaces, down to approximately 21°. This result primarily indicates the occurrence of direct oxidation of the polymer itself. However, it may also be partially attributed to the deposition of manganese oxide residues on the surface, which further enhances hydrophilicity, as metal oxides are generally known to exhibit intrinsically hydrophilic properties.

The surface layer, regardless of its specific composition, demonstrated moderate resistance to abrasion under normal conditions; however, under high mechanical loads it was removed together with the uppermost layer of polyethylene, thereby exposing the underlying hydrophobic material. It should be noted that this observation is of limited practical relevance for textured surfaces, as their structural features are inherently susceptible to mechanical damage.

Hydrophobization of the oxidized polyethylene surfaces in an isopropanol solution of stearic acid effectively restored their wettability to the initial levels characteristic of untreated polyethylene, with contact angles in the range of 94–96°.

Surface textures obtained by femtosecond laser ablation Fig. 2 (a, b) are anisotropic groove-asperity patterns with identical periods of 60 µm but different groove/asperity width ratio. For the texture 1 (Fig 2.a) the asperity and groove-bottom widths are about 15 µm. For the texture 3 (Fig 2.b) the asperity width is 45 µm. Their cross-sections exhibit truncated pyramid geometry. As it can be seen from Fig 2.c and Fig 2.d – the negative textures on a polycarbonate surface remain the geometrical configuration of the main patterns including period and width of its structural elements. The positive textures obtained on the surface of LDPE (Fig 2.e, f) are identical to that of the initial metal templates. The texture depth is decreased to 18 µm from 22 µm of original texture, that may be explained by increased viscosity of the polyethylene melt and not complete fulfillment of the texture void volumes. However, this depth deviation is within the error margin of measurement and is discussable.

Table 1

Static water contact angles of LDPE surfaces

Material	Water contact angle, °		
	Pristine	Oxidized	Hydrophobized
Flat	91±1,5	28±2,0	95±1,5
Texture 1 (parallel)	125±1,5	103±2	130±2
Texture 1 (perpendicular)	130±1,5	107±2	131±2
Texture 2 (parallel)	130±1,5	126±1,5	133±1,5
Texture 2 (perpendicular)	136±1,5	130±1,5	145±1,5

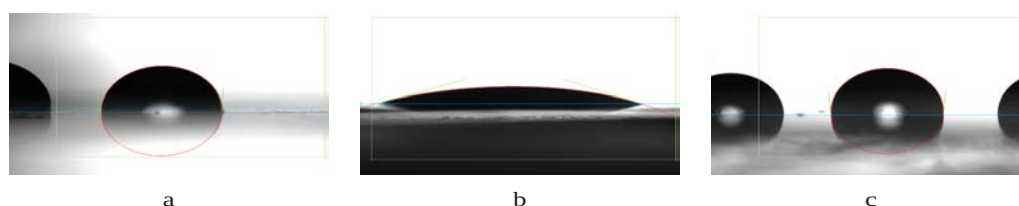


Fig. 1. Water droplet photo on the polyethylene surface: before oxidation (a), after oxidation (b), after treatment with stearic acid (c)

At the next step of the study, obtained textured surfaces of LDPE were subsequently oxidized and hydrophobized. The change of the surface energy was monitored via water contact angle measurement (Table 1). Since the obtained textures were anisotropic, the contact angle measurement may be made parallel or perpendicular to the direction of structure.

The textured polyethylene samples exhibited significantly higher contact angles compared to the flat, untreated polyethylene surface. This behavior can be explained by the Wenzel and Cassie–Baxter effects, which describe the enhancement of apparent contact angles as a function of surface roughness. At the same time, Texture #1 was less effective than Texture #2 in increasing the contact angle with water. This difference is most likely related to the structural features of Texture #1, particularly the comparatively wide spacing between its surface elements. It may be noted

that the texturing increases the water contact angle value up to 46° in comparison to a flat surface of polyethylene.

Upon oxidation, all samples demonstrated a decrease in contact angle. This effect is associated with surface polarization, namely the introduction of polar functional groups that enhance interactions with water. The trend was most pronounced for the flat polyethylene surface. In contrast, for the textured samples, the surface topography remained an effective factor in maintaining water repellency; as a result, the contact angles did not drop catastrophically but instead remained at relatively high values.

Subsequent treatment with stearic acid significantly increased the contact angles of the oxidized surfaces. The values not only returned to their original levels but in some cases exceeded them. For instance, on the flat polyethylene surface the con-

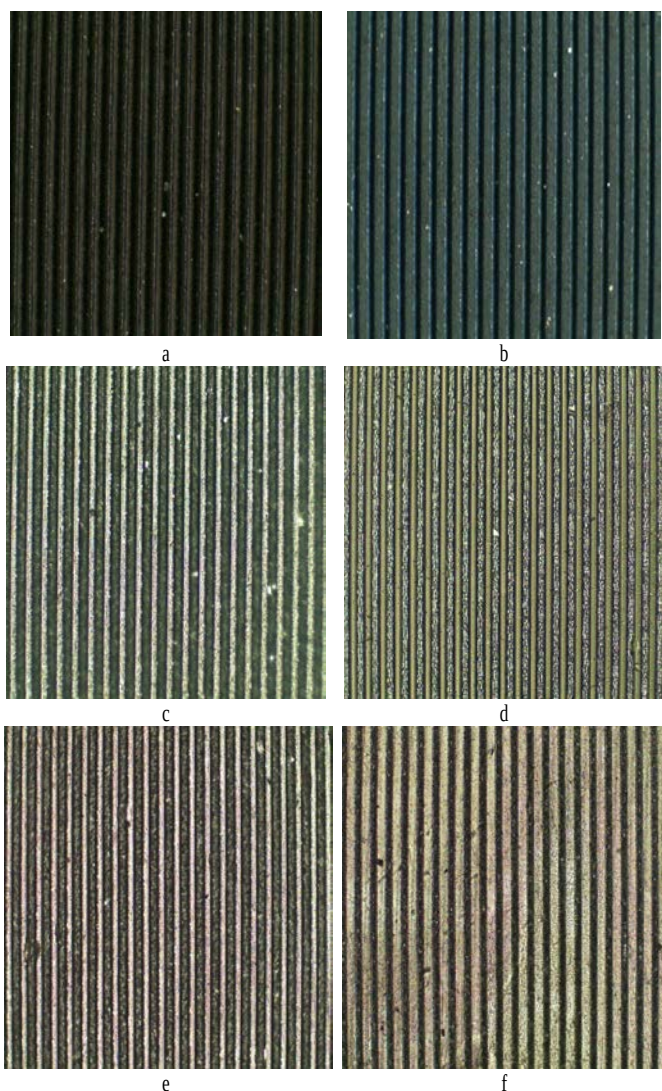


Fig. 2. Textures of samples: texture 1 (a, c, e); texture 2 (b, d, f); metal templates (a, b), polycarbonate negatives (c, d); polyethylene positives (e, f)

tact angle increased by approximately 4° compared to the untreated material, a difference beyond the experimental error and therefore statistically significant. For Texture #1, the increase ranged from 1° to 5° , depending on the measurement orientation. The most pronounced effect was observed for Texture #2, where the contact angle increased by nearly 10° in the perpendicular measurement orientation.

The obtained highest value of the water contact angle is 145° , that is 54° higher than the initial material indicating the effectiveness used texturing and treatment approach. The critical surface energy of these structures, determined as the lowest surface tension of the liquid, at which the wetting plateau remains is found to be close to 55 mJ/m^2 . This can be used as an indicator of water repellent properties stability against medium polarity liquids as well.

The contact angle data suggests that during stearic acid treatment, the molecules anchor to the oxidized polyethylene surface via polar functional groups, while the hydrophobic hydrocarbon chains orient outward. This results in the formation of a more uniform and defect-free hydrophobic layer than that of pristine polyethylene. The enhanced efficiency of the treatment is largely due to the combined effect of oxidation and subsequent hydrophobization. Oxidation with potassium permanganate may lead to the deposition of small amounts of manganese oxides (MnO_2) in the upper surface layers. These oxides can interact with stearic acid, thereby further improving the effectiveness of the surface modification.

In preliminary studies, we also attempted to hydrophobize oxidized polyethylene surfaces using alkoxysilanes. However, in this case the treatment proved to be largely ineffective, whereas stearic acid demonstrated substantially higher efficiency. An unexpected finding was that textured polymer films, when subjected to hydrophilic pretreatment, could also be functionalized with hydrophilic metal-based nanoparticles deposited onto the surface. Such modified films could subsequently be hydrophobized using agents selected for maximum compatibility with the nanoparticles, opening new possibilities for tailored surface functionalization.

Although this line of investigation requires further research and development, it represents a promising

and, importantly, reproducible approach compared to simple polarization of polyethylene surfaces by oxidation. A major advantage of this method is that the polymer itself is not degraded, allowing it to retain its mechanical properties, operational lifetime, and environmental resistance.

Conclusions. In this work, a method for regulating the surface energy of polyethylene was demonstrated through a sequence of oxidation and subsequent hydrophobization. Oxidation reduced the contact angle from 91° to 28° , while hydrophobization restored and even increased it to 96° on flat surfaces. Surface texturing alone raised the water contact angle to 135° , and when combined with the oxidation–hydrophobization cycle, the contact angle reached 145° , which is 54° higher than that of pristine polyethylene.

The modified materials were shown to be resistant to wetting by liquids with reduced surface tension. The critical surface energy at which wetting commenced was determined to be 55 mJ m^{-2} , a comparatively high threshold value. This demonstrates that the combination of texturing and chemical functionalization provides a synergistic effect, enabling the creation of highly non-wettable surfaces.

A promising direction for extending these results lies in the incorporation of nanoparticles, such as metallic nanoparticles, to generate secondary textures on polyethylene replicas fabricated by the template method. These nanoparticles can be readily functionalized with simple hydrophobizing agents, including stearic acid, which may further enhance the performance and allow the fabrication of superhydrophobic surfaces using the same principle.

Finally, porous surfaces present themselves as an excellent platform for the design of infused surfaces. As demonstrated, their polarity – and therefore their affinity toward infused liquids – can be tuned on demand, offering additional flexibility for developing advanced liquid-repellent and multifunctional materials.

Funding. This study was funded within the scope of the project # 2025.06/0031 “Polymeric liquid-infused films with de-icing capability” (contract No. 217.0031 01.08.2025) by the National Research Foundation of Ukraine.

Bibliography:

1. Liquid-Infused Surfaces: A Review of Theory, Design, and Applications / M. Villegas et al. *ACS Nano*. 2019. Vol. 13, № 8. P. 8517–8536. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b04129>.
2. Life and death of liquid-infused surfaces: a review on the choice, analysis and fate of the infused liquid layer / S. Peppou-Chapman et al. *Chemical Society Reviews*. 2020. Vol. 49, № 11. P. 3688–3715. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0cs00036a>.

3. Durability of Slippery Liquid-Infused Surfaces: Challenges and Advances / D. Tripathi et al. *Coatings*. 2023. Vol. 13, № 6. P. 1095. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13061095>.
4. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity / T.-S. Wong et al. *Nature*. 2011. Vol. 477, № 7365. P. 443–447. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10447>.
5. Superhydrophilic modification of polycarbonate substrate surface by organic plasma polymerization film / K.-W. Lu et al. *Materials*. 2022. Vol. 15, № 13. P. 4411. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15134411>.
6. Functional and versatile superhydrophobic coatings via stoichiometric silanization / L. Zhang et al. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21219-y>.
7. An Overview of Potential Alternatives for the Multiple Uses of Per- and Polyfluoroalkyl Substances / R. Figuière et al. *Environmental Science & Technology*. 2025. Vol. 59, № 4. P. 2031–2042. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c09088>.
8. Myronyuk O., Baklan D., Rodin A. M. UV Resistance of Super-Hydrophobic Stainless Steel Surfaces Textured by Femtosecond Laser Pulses. *Photonics*. 2023. Vol. 10, № 9. P. 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics10091005>.
9. Analysis of the surface chemistry of oxidized polyethylene: comparison of XPS and ToF-SIMS / D. Briggs et al. *Surface and Interface Analysis*. 2003. Vol. 35, № 2. P. 156–167. DOI: <https://doi.org/10.1002/sia.1515>.
10. A Machine Learning Model for the Prediction of Water Contact Angles on Solid Polymers / J. Sena et al. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2025. Vol. 129, № 10. P. 2739–2745. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c06608>.
11. Kurihara K., Hokari R., Takada N. Capillary Effect Enhancement in a Plastic Capillary Tube by Nanostructured Surface. *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 4. P. 628. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13040628>.

Миронюк О.В., Баклан Д.В., Савченко Д.О., Пашенко Є.О. РЕГУЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗМОЧУВАННЯ ПЛІВОК З ПОЛІЕТИЛЕНУ НИЗЬКОЇ ЩІЛЬНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ХІМІЧНОГО ОКИСНЕННЯ ТА МОДИФІКАЦІЇ СТЕАРИНОВОЮ КИСЛОТОЮ

Просочені поверхні нещодавно стали перспективним класом матеріалів, які долають обмеження класичних супергідрофобних покриттів і демонструють високу стабільність та багатofункціональність у таких сферах застосування, як антиожедні, водовідштовхувальні покриття та бар'єрні покриття. Розглянуто проблему контролю змочуваності поліетилену як типового поліолефінового субстрату з метою розробки відтвореного та екологічно сумісного способу регулювання його поверхневої енергії. Застосовано комбіновану стратегію, що включала виготовлення шаблону за допомогою фемтосекундного лазера, термопресування поліетилену для отримання текстурованих реплік, подальше хімічне окислення азотною кислотою та перманганатом калію, а також остаточну гідрофобізацію за допомогою стеаринової кислоти як біологічно похідної альтернативи фторованим модифікаторам. Досліджено морфологію поверхні, ефекти окислення та поведінку змочування за допомогою мікроскопії та вимірювання кута змочування. Показано, що чистий поліетилен має кут змочування водою $\sim 91^\circ$, що відповідає його неполярній та гідрофобній природі. Окислення значно зменшило кут змочування до 28° через поляризацію поверхні та можливе осадження оксидів марганцю, тоді як подальша обробка стеариновою кислотою відновила і навіть перевищила початкові значення, давши $\sim 96^\circ$ на плоских поверхнях. Результати показали, що текстуровання збільшило кут змочування до 135° , а в поєднанні з окисленням гідрофобізацію до 145° , що на 54° перевищує показники необробленого матеріалу. Показано, що модифіковані поверхні були стійкими до змочування рідинами з низьким поверхневим натягом, з критичною поверхневою енергією 55 мДж/м^2 , що вважається високим порогом для незмочуваності. Встановлено, що ключовим механізмом стабільної гідрофобізації є закріплення молекул стеаринової кислоти за допомогою полярних груп, введених під час окислення, з зовнішньою орієнтацією вуглеводневих хвостів. Виявлено, що підхід є відтворюваним і не порушує механічної цілісності поліетилену. Перспективи подальшого вдосконалення включають введення металевих наночастинок для формування вторинних текстур та їх подальшу гідрофобізацію, що може сприяти розвитку супергідрофобних та інфузованих поверхонь. Результати підкреслюють масштабовану методологію виробництва нефторованих, стійких та супергідрофобних полімерних поверхонь.

Ключові слова: полімер, поліетилен, змочування, хімічна обробка, модифікація поверхні, термопресування, кут змочування.

Дата надходження статті: 11.09.2025

Дата прийняття статті: 03.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 544.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/28>**Петренко Т.В.**

Національний університет харчових технологій

Ковальова С.О.

Національний університет харчових технологій

Макаренко О.Г.

Національний університет харчових технологій

Майборода О.І.

Національний університет харчових технологій

ДЗЕТА-ПОТЕНЦІАЛ ЯК ФАКТОР СТАБІЛЬНОСТІ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

Дисперсні системи, що охоплюють колоїдні розчини, суспензії, емульсії та піни, є критично важливими компонентами в багатьох технологічних процесах та широко використовуються у харчовій, фармацевтичній, косметичній промисловості, а також у водоочищенні. Однак їхня термодинамічна нестабільність – схильність до самовільної агрегації, седиментації чи коалесценції – є однією з ключових проблем, що прямо обмежує якість, функціональні властивості та термін придатності кінцевих продуктів.

Одним із фундаментальних параметрів, який визначає стабільність цих гетерогенних систем, є дзета-потенціал (ζ -потенціал). Він являє собою різницю потенціалів на площині ковзання (зсуву) подвійного електричного шару (ПЕШ) і слугує мірою сили електростатичного відштовхування між диспергованими частинками. Величина ζ -потенціалу є надійним індикатором стійкості дисперсної системи до процесів дестабілізації, таких як агрегація або флокуляція.

Ця стаття представляє комплексний аналіз ролі ζ -потенціалу в стабілізації різноманітних дисперсних систем на основі сучасних наукових досліджень. Розглянуто особливості його впливу на різні типи систем:

- **Ліофобні колоїди:** Високе абсолютне значення ζ -потенціалу (зазвичай $>|25-30|$ мВ) створює значний енергетичний бар'єр, який є головним механізмом запобігання коагуляції та флокуляції.
- **Суспензії:** ζ -потенціал необхідний для підтримання гомогенності, оскільки електростатичне відштовхування запобігає агрегації частинок, яка б прискорила седиментацію.
- **Емульсії:** Значний ζ -потенціал створює відштовхування між диспергованими краплями, що є ключовим для запобігання їхньому злиттю (коалесценції).
- **Піни:** Заряджені поверхні рідких плівок створюють електростатичне відштовхування, яке протидіє їхньому стоншенню та підвищує стабільність піни.
- **Нанодисперсні системи:** Через високу питому поверхню, високе абсолютне значення ζ -потенціалу є критично важливим для забезпечення сильного відштовхування та запобігання агрегації наночастинок.

Проаналізовано ключові фактори, що найбільше впливають на величину ζ -потенціалу, включаючи рН середовища та концентрацію електролітів. Збільшення концентрації іонів електролітів призводить до стискання дифузійного шару ПЕШ і, відповідно, до зменшення ζ -потенціалу. Встановлено, що вплив іонів на ζ -потенціал швидко зростає з їхньою валентністю, особливо для іонів, заряд яких протилежний заряду колоїдної частинки.

Показано, що існує критичне значення рН, яке називається ізоелектричною точкою (ІЕТ), при якому заряд поверхні частинок і, відповідно, ζ -потенціал дорівнює нулю. ІЕТ є точкою найнижчої стабільності системи, оскільки електростатичне відштовхування відсутнє. Отже, високе абсолютне значення ζ -потенціалу, незалежно від знаку заряду, є визначальним для забезпечення ефективного відштовхування та запобігання агрегації.

Висвітлено широке практичне застосування контролю ζ -потенціалу в промисловості: для оптимізації рецептур, контролю якості сировини та готової продукції, а також для прогнозування терміну

© Петренко Т.В., Ковальова С.О., Макаренко О.Г., Майборода О.І., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

придатності. Зокрема, у фармацевтиці це дозволяє підвищити біодоступність ліків, а в косметичці – контролювати текстуру і проникнення активних інгредієнтів.

Таким чином, ζ -потенціал є потужним і фундаментальним інструментом для прогнозування, розуміння та активного контролю стабільності дисперсних систем, що дозволяє суттєво підвищити технологічну ефективність виробництва та покращити якість кінцевої продукції у різних галузях.

Ключові слова: дзета-потенціал, дисперсні системи, стабільність, емульсії, суспензії, колоїди, наночастинки, агрегація, флокуляція, коалесценція, електростатичне відштовхування, ізоелектрична точка.

Постановка проблеми. Дисперсні системи поширені в природі та технологічних процесах, демонструючи різноманіття агрегатних станів, розмірів частинок та міжфазних взаємодій. Стабільність дисперсних систем, що складаються з дрібнодисперсних частинок у рідкому або газоподібному середовищі, є ключовим фактором, що визначає властивості широкого спектра продуктів, включаючи харчові продукти, косметичні засоби, фармацевтичні препарати та будівельні матеріали.

Суспензії, як дисперсні системи з твердою дисперсною фазою в рідкому дисперсійному середовищі, знаходять широке застосування в різних галузях. У харчовій промисловості прикладами суспензій є крохмальне молоко, неочищені рослинні олії, дифузійний сік та вапняне молоко. Технологічні процеси, такі як адсорбційне рафінування олії, використовують суспензії бентонітових глин як адсорбенти. Водні суспензії глинистих мінералів застосовуються для очищення та освітлення рідких продуктів. Концентровані суспензії, такі як косметичні та фармацевтичні препарати, цементні розчини, лаки та фарби, є важливими компонентами в будівництві та медицині. Приготування паст, включаючи зубні пасту, передбачає використання рідин з підвищеною в'язкістю та температурою кипіння, що демонструє складність рецептур.

Емульсії також широко представлені в природі та промисловості. Прикладами є молоко, вершки, сметана та маргарин. Водні емульсії, де вода є дисперсійним середовищем, а неполярні рідини – дисперсною фазою, поширені в природі та використовуються в олієжировій, молочній, кондитерській та хлібопекарській промисловості.

Суспензії та емульсії, як гетерогенні дисперсні системи, характеризуються термодинамічною нестійкістю, що проявляється у седиментації та агрегації дисперсної фази. Це зумовлює значну увагу, що приділяється дослідженню їхньої стабільності, з метою оптимізації їхніх властивостей та розширення сфери застосування [1].

Одним з ключових параметрів, що визначають стабільність дисперсних систем, є дзета-потенціал. Він характеризує на площині ковзання (зсуву) і відображує силу електростатичного від-

штовхування між частинками. Величина дзета-потенціалу може служити індикатором стійкості дисперсної системи до агрегації або флокуляції.

Сьогодні існує недостатнє розуміння взаємозв'язку між величиною дзета-потенціалу та стабільністю дисперсних систем у різних умовах, таких як зміна рН, іонної сили, температури, а також при додаванні різних хімічних речовин. Крім того, існує потреба у розробці стандартизованих методик вимірювання дзета-потенціалу та інтерпретації отриманих даних, особливо для складних дисперсних систем.

Недостатньо вивченими залишаються питання впливу дзета-потенціалу на довготривалу стабільність дисперсних систем, а також на їх поведінку в умовах, що імітують реальні промислові процеси. Існує також потреба у розробці практичних рекомендацій щодо використання дзета-потенціалу для контролю та оптимізації стабільності дисперсних систем у промислових процесах, що дозволить підвищити ефективність виробництва та покращити якість кінцевих продуктів.

Таким чином, дослідження дзета-потенціалу як фактора стабільності дисперсних систем є актуальним та має велике практичне значення для різних галузей науки та промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі колоїдної хімії підкреслюють зростаючу важливість дзета-потенціалу як ключового параметра, що визначає стабільність дисперсних систем. Сучасні наукові публікації демонструють широкий спектр застосувань дзета-потенціалу, від наноматеріалів і фармацевтики до харчової промисловості та екології.

Дзета-потенціал на поверхні наночастинок оксидів металів визначає їх взаємодію з біологічними молекулами та клітинами. Змінюючи поверхневий заряд наночастинок, можна контролювати їх дзета-потенціал і, відповідно, їх біомедичні властивості. Оптимізація дзета-потенціалу наночастинок дозволяє покращити їх ефективність у доставці ліків, діагностиці та терапії. Точне регулювання дзета-потенціалу, поряд з розміром, формою, поверхнею та кристалічною структурою наночастинок оксидів металів є ключовим для оптимізації їх біомедичних властивостей

[2]. Дослідження показують, що дзета-потенціал безпосередньо впливає на біорозподіл, клітинне поглинання, реакційну здатність та здатність до вивільнення іонів.

Автори роботи [3] провели масштабну роботу зі збору даних про дзета-потенціали наночастинок оксидів металів (MONPs) з різноманітних джерел, включаючи наукові статті, публічні бази даних та дослідницькі звіти. Автори інтерпретували вплив на стабільність наночастинок і дзета-потенціал різних факторів, таких як електронегативність, ковалентний індекс, заряд металу та інші параметри на дзета-потенціал. Особливу увагу було приділено аналізу впливу розміру наночастинок та типу середовища на дзета-потенціал і на агрегацію наночастинок та їх взаємодію з біологічними молекулами.

У фармацевтичній галузі дзета-потенціал відіграє важливу роль у розробці стабільних лікарських форм, таких як наноліпосоми та наносуспензії. Останні дослідження демонструють, що контроль дзета-потенціалу дозволяє підвищити біодоступність лікарських речовин і продовжити термін їх зберігання [4].

Дзета-потенціал відіграє ключову роль у визначенні стабільності наночастинок оксиду кремнію (SiO_2) у водних середовищах [5]. Показано, що величина та знак дзета-потенціалу безпосередньо впливають на схильність наночастинок до агрегації або диспергування. У статті детально розглянуто, як зміни рН та іонної сили водних розчинів впливають на дзета-потенціал SiO_2 наночастинок. Показано, що збільшення іонної сили розчину має ефект пригнічення дзета-потенціалу, що призводить до нестабільності наночастинок. Результати дослідження мають важливе практичне значення для різних сфер застосування наночастинок SiO_2 , таких як фармацевтика і матеріалознавство.

У роботі [6] надано вичерпний аналіз теорії та практичного застосування дзета-потенціалу, детально розглянуто теоретичні основи дзета-потенціалу, включаючи його визначення, вимірювання та інтерпретацію, пояснено зв'язок дзета-потенціалу зі стабільністю колоїдних систем і його вплив на взаємодію між частинками. У статті обговорено різні методи вимірювання дзета-потенціалу, включаючи електрофорез, електроакустичні методи та інші, проаналізовано переваги і недоліки кожного методу. Автори розглядають широкий спектр застосувань дзета-потенціалу в колоїдній науці, у тому числі стабілізацію та дестабілізацію колоїдних суспензій, флокуляцію та коагуляцію, адсорбцію та десорб-

цію, електрокінетичні явища. У статті висвітлено практичне значення дзета-потенціалу в різних галузях, таких як водоочищення, фармацевтика, виробництво кераміки, виробництво паперу.

Метою даної роботи є комплексний аналіз сучасних досліджень, що стосуються ролі дзета-потенціалу в стабілізації дисперсних систем, а саме систематизація ключових факторів, що визначають величину дзета-потенціалу та їхній вплив на стабільність дисперсних систем; оцінка можливостей застосування дзета-потенціалу як предиктора та регулятора стабільності дисперсних систем; виявлення перспективних напрямів подальших досліджень у цій галузі.

Виклад основного матеріалу. Колоїдні розчини являють собою дисперсні системи, в яких розмір частинок дисперсної фази коливається від 1 до 1000 нм. Залежно від характеру взаємодії між дисперсною фазою та дисперсійним середовищем, колоїди поділяють на ліофільні (стійкі) та ліофобні (нестійкі).

Ліофільні колоїди, такі як розчини білків або полімерів у воді, є термодинамічно стабільними завдяки сильному сольватному шару, що утворюється навколо колоїдних частинок внаслідок їхньої спорідненості до розчинника. Дзета-потенціал у таких системах може відігравати другорядну роль у стабілізації, оскільки головним фактором є стеричний та ентропійний ефекти, зумовлені сольватними оболонками. Однак наявність певного заряду на поверхні ліофільних частинок все ж сприяє їхньому відштовхуванню та запобігає агрегації при зміні умов середовища (наприклад, додаванні електролітів у високій концентрації, що може призвести до десольватації).

Ліофобні колоїди, такі як колоїди металів або сульфідів, є термодинамічно нестійкими і потребують додаткових стабілізуючих факторів для запобігання коагуляції та флокуляції – процесам злипання дрібних частинок у більші агрегати, що призводить до осадження. У випадку ліофобних колоїдів, електростатичне відштовхування, зумовлене наявністю електричного заряду на поверхні колоїдних частинок і, відповідно, значним за величиною дзета-потенціалом, є основним механізмом стабілізації.

Високе абсолютне значення дзета-потенціалу (зазвичай $> |25-30|$ мВ) створює значний енергетичний бар'єр, який перешкоджає зближенню частинок на відстані, достатній для прояву сил Ван дер Ваальса, що викликають притягання. Зменшення дзета-потенціалу, наприклад, шляхом додавання електролітів, призводить до стискання

електричного подвійного шару, зменшення електростатичного відштовхування та, як наслідок, до втрати стабільності та коагуляції колоїду. Критичне значення дзета-потенціалу, при якому починається швидка коагуляція, залежить від природи колоїдної системи, розміру частинок та інших факторів.

Суспензії – це дисперсні системи, що складаються з відносно великих твердих частинок (розміром понад 1 мкм), розподілених у рідкому дисперсійному середовищі. На відміну від колоїдів, на стабільність суспензій значний вплив має гравітаційна сила, що зумовлює седиментацію – осідання частинок під дією сили тяжіння.

Дзета-потенціал відіграє важливу роль у підтриманні гомогенності суспензій, запобігаючи агрегації та, як наслідок, прискоренню седиментації. Високий дзета-потенціал призводить до електростатичного відштовхування між частинками, що перешкоджає їхньому злипанню у більші агрегати з вищою швидкістю осідання за законом Стокса.

Зменшення дзета-потенціалу в суспензіях може призвести до флокуляції – утворення рихлих агрегатів (флокул), які прискорюють седиментацію, але завдяки пористій структурі утворюють менш щільний осад, ніж щільні агрегати, що виникають при коагуляції.

Для стабілізації суспензій часто використовують стабілізатори, які адсорбуються на поверхні твердих частинок, змінюючи їхній поверхневий заряд і, відповідно, дзета-потенціал, або створюючи стеричний бар'єр, що запобігає зближенню частинок.

Емульсії – це дисперсні системи, що складаються з двох або більше незмішуваних рідин, одна з яких диспергована у вигляді крапель в іншій. Основною проблемою стабільності емульсій є коалесценція – злиття дрібних крапель у більші, що призводить до розшарування емульсії на окремі фази.

Дзета-потенціал на поверхні диспергованих крапель відіграє важливу роль у запобіганні коалесценції. Наявність значного за величиною дзета-потенціалу створює електростатичне відштовхування між краплями, перешкоджаючи їхньому зближенню на відстань, достатню для злиття під дією сил Ван дер Ваальса.

Для стабілізації емульсій широко використовуються емульгатори – поверхнево-активні речовини (ПАР), які адсорбуються на міжфазній межі, знижуючи міжфазний натяг і утворюючи механічний бар'єр, що перешкоджає зближенню

крапель. Багато емульгаторів також впливають на поверхневий заряд крапель, змінюючи величину дзета-потенціалу та сприяючи електростатичній стабілізації.

Наприклад, аніонні ПАР надають краплям негативного заряду, що призводить до їхнього взаємного відштовхування. Катіонні ПАР, навпаки, заряджають краплі позитивно. Неіоногенні ПАР стабілізують емульсії переважно за рахунок стеричного ефекту, але також можуть впливати на гідратацію поверхні крапель і, опосередковано, на електростатичні взаємодії.

Піни – це дисперсні системи, в яких газ диспергований у рідині у вигляді бульбашок. Стабільність піни визначається стійкістю рідких плівок, що розділяють газові бульбашки, до руйнування (розриву або злиття).

Дзета-потенціал на поверхні рідких плівок відіграє важливу роль у їхній стабілізації. Заряджені поверхні плівок створюють електростатичне відштовхування, яке протидіє їхньому стоншенню під дією капілярних сил та гравітації. Високий дзета-потенціал сприяє утворенню структурно-механічного бар'єру (бар'єру Дерягіна), який запобігає зближенню протилежних поверхонь плівки до критичної відстані, при якій можуть проявитися сили Ван дер Ваальса, що призводять до розриву плівки.

Для стабілізації пін широко використовуються піноутворювачі – поверхнево-активні речовини, які адсорбуються на межі розділу газ-рідина, знижують поверхневий натяг і утворюють пружні плівки. Багато піноутворювачів також впливають на заряд поверхні плівок, збільшуючи абсолютне значення дзета-потенціалу та підвищуючи стабільність піни.

Фактори, що зменшують дзета-потенціал (наприклад, додавання електролітів), можуть призвести до дестабілізації піни та її швидкого руйнування.

Нанодисперсні системи, що включають наночастинки, нановолокна та нанотрубки, набувають все більшого значення в різних галузях завдяки своїм унікальним властивостям. Однак через високу питому поверхню та велику поверхневу енергію, наночастинки схильні до агрегації, що ускладнює їхнє рівномірне диспергування та використання їхнього повного потенціалу.

Дзета-потенціал є критично важливим фактором стабілізації нанодисперсних систем. Високе абсолютне значення дзета-потенціалу забезпечує сильне електростатичне відштовхування між наночастинками, запобігаючи їхній агрегації та

сприяючи утворенню стабільних колоїдних розчинів або суспензій.

Особливості впливу дзета-потенціалу на нанодисперсні системи полягають у наступному:

- Значна роль поверхневого заряду: через велику питому поверхню, поверхневий заряд наночастинок має значний вплив на їхні взаємодії та стабільність.

- Вплив розміру та форми наночастинок: дзета-потенціал може залежати від розміру та форми наночастинок, що, в свою чергу, впливає на їхню схильність до агрегації.

- Конкуренція між електростатичним відштовхуванням та силами Ван дер Ваальса: на малих відстанях сили Ван дер Ваальса можуть бути значними, тому для стабілізації нанодисперсних систем часто потрібен високий дзета-потенціал для подолання цих сил.

- Важливість стеричної стабілізації: крім електростатичної стабілізації, для запобігання агрегації наночастинок широко використовують полімерні стабілізатори, які адсорбуються на їхній поверхні, створюючи стеричний бар'єр. Ці полімери також можуть впливати на дзета-потенціал поверхні наночастинок.

Контроль дзета-потенціалу є ключовим аспектом при розробці та застосуванні нанодисперсних систем у таких областях, як медицина (доставка ліків), каталіз, матеріалознавство та електроніка.

Частинки твердої дисперсної фази, які зависли в рідині, перебувають у безперервному хаотичному русі. Завдяки надлишку вільної енергії вони під час зіткнення повинні злипатися і утворювати осад. Проте вже близько 130 років тому навчилися готувати стійкі дисперсні системи, які руйнуються лише за певних умов. Пояснити це можна, лише допустивши, що дисперсні частинки в цих розчинах покриті якимось захисним шаром, який перешкоджає їх злипанню. Можливі різні механізми захисної дії, але найбільше значення має подвійний електричний шар (ПЕШ). Він виникає внаслідок адсорбції іонів електролітів на поверхні кристалів твердої фази. Під час зіткнення частинок з однойменно зарядженими поверхневими шарами іонів виникають сили відштовхування, які не дають частинкам злипатися.

Вирішальний внесок для встановлення будови ПЕШ мали дослідження електрокінетичних явищ (електрофорез, електроосмос). Назвали їх електрокінетичними тому, що під дією електричного поля спостерігалися ті чи інші переміщення речовин у дисперсних системах.

Електрокінетичні явища можна пояснити існуванням на поверхні дисперсної фази подвійного

електричного шару, тобто виникненням між дисперсною фазою і дисперсійним середовищем різниці потенціалів, яка зумовлена адсорбцією іонів. Тобто, на частинках виникають два стрибки потенціалу. Один з них, більший за величиною, виникає між потенціалвизначальними іонами і протиіонами. Цей стрибок потенціалу називається електричним, або термодинамічним потенціалом і позначається літерою ϕ . Другий потенціал виникає на межі між дифузійним і адсорбційним шаром і позначається літерою ζ . Цей потенціал визначає швидкість переміщення фаз і має назву електрокінетичний потенціал, або дзета-потенціал. Дзета-потенціал має знак заряду твердої поверхні, він менший за ϕ -потенціал. ζ -потенціал суттєво змінюється залежно від умов, у яких перебуває система.

Дзета-потенціал – це найважливіша характеристика ПЕШ, його величина зумовлює стабільність дисперсної системи. Передусім, величина ζ -потенціалу залежить від концентрації присутніх у середовищі електролітів. Збільшення концентрації іонів у золі призводить до зменшення товщини дифузійного шару міцел і, відповідно, до зменшення величини дзета-потенціалу. У той же час величина загального потенціалу ПЕШ – ϕ при цьому залишається незмінною. Якщо дифузійний шар, в результаті збільшення концентрації іонів стороннього електроліту, стискається до товщини адсорбційного шару, то дзета-потенціал стає рівним нулю.

Величина дзета-потенціалу залежить не тільки від концентрації іонів електроліту, але і від їх валентності, при чому, головну роль проявляють іони, заряд яких протилежний заряду гранули. Вплив іонів на величину ζ -потенціалу швидко зростає з їх валентністю. Якщо валентність іонів однакова, то вплив іонів на дзета-потенціал зростає пропорційно об'єму іонів. Це пояснюється тим, що зі збільшенням об'єму іонів, збільшується їх здатність поляризуватися, що дозволяє їм ближче підійти до поверхні частинок. Збільшення радіусів іонів призводить до зменшення їх ступеня гідратації, що також сприяє потраплянню іонів в адсорбційний шар. Великий вплив на величину дзета-потенціалу виявляють одновалентні органічні катіони барвників і алкалоїдів, які легко поляризуються. Фактично ζ -потенціал є критерієм стабільності дисперсних систем. При $\zeta \leq 0,03$ В товщина дифузійного шару дорівнює нулю: всі протиіони при цьому розміщені в адсорбційному шарі, що призводить до миттєвої агрегації частинок.

Також на значення дзета-потенціалу має значний вплив рН середовища. Поверхня частинок у дисперсній системі може мати позитивний або негативний заряд, залежно від її хімічного складу та взаємодії з іонами в розчині. Зміна рН середовища призводить до зміни заряду поверхні частинок, що, у свою чергу, впливає на дзета-потенціал. У кислому середовищі, коли поверхня частинок має позитивний заряд, дзета-потенціал також буде позитивним. У лужному середовищі, коли поверхня частинок має негативний заряд, дзета-потенціал також буде негативним. Однак, існує певне значення рН, при якому заряд поверхні частинок дорівнює нулю. Це значення називається ізоелектричною точкою (ІЕТ). При ІЕТ стабільність дисперсної системи є найнижчою, оскільки відсутнє електростатичне відштовхування між частинками. Віддалення від ІЕТ у будь-якому напрямку призводить до збільшення абсолютного значення дзета-потенціалу та підвищення стабільності дисперсної системи. Тому, рН є критичним фактором, що впливає на дзета-потенціал, і його контроль є важливим для забезпечення стабільності дисперсних систем [7-11].

Аналіз останніх наукових публікацій показує, що дзета-потенціал залишається ключовим параметром для розуміння та контролю стабільності дисперсних систем у різних галузях.

Вимірювання та регулювання дзета-потенціалу є важливим інструментом для забезпечення якості та стабільності харчових продуктів:

- високий дзета-потенціал запобігає агрегації частинок, забезпечуючи тривале збереження однорідності продукту;
- оптимізація дзета-потенціалу дозволяє контролювати реологічні властивості харчових продуктів, досягаючи бажаної текстури;
- підвищення стабільності дисперсних систем сприяє збільшенню терміну придатності продуктів;
- контроль дзета-потенціалу дозволяє досягти оптимальних органолептичних властивостей харчових продуктів [12, 13].

Дзета-потенціал є важливим інструментом для створення високоякісних та безпечних косметичних продуктів, що відповідають вимогам споживачів:

- вимірювання дзета-потенціалу допомагає розробникам створювати стабільні емульсії та дисперсії, запобігаючи агрегації частинок і забезпечуючи тривалий термін зберігання продукту;
- контроль дзета-потенціалу дозволяє регулювати такі характеристики, як текстура, кон-

систенція та проникнення активних інгредієнтів у шкіру;

- знання дзета-потенціалу допомагає мінімізувати ризик небажаних реакцій, таких як подразнення шкіри, через стабільність та передбачуваність косметичних формул;

- цей параметр використовується для контролю якості сировини та готової продукції [14-16].

Використання дзета-потенціалу є важливим інструментом для розробки та виробництва ефективних та стабільних фармацевтичних препаратів:

- вимірювання дзета-потенціалу дає змогу прогнозувати агрегацію або флокуляцію частинок, що критично важливо для терміну придатності та якості лікарських препаратів;

- контроль дзета-потенціалу дозволяє регулювати електростатичні взаємодії між частинками, покращуючи дисперсність та однорідність лікарських форм;

- впливаючи на дзета-потенціал, можна змінювати взаємодію лікарських частинок з біологічними мембранами, підвищуючи їх проникнення та терапевтичну ефективність;

- вимірювання дзета-потенціалу використовується для контролю якості на різних етапах виробництва, забезпечуючи відтворюваність та безпеку лікарських засобів [17-20].

Також, розуміння та контроль дзета-потенціалу є важливими для ефективного очищення води та забезпечення її якості [21-22].

Таким чином, численні дослідження підтверджують ключову роль дзета-потенціалу в стабілізації дисперсних систем. Цей параметр є не лише цінним індикатором електростатичних взаємодій між частинками, але й потужним інструментом для прогнозування та контролю стабільності дисперсних систем у різних галузях.

Дослідження демонструють, що високий дзета-потенціал, незалежно від знаку заряду, забезпечує ефективне електростатичне відштовхування, запобігаючи агрегації та коагуляції частинок. Це особливо важливо для харчової, фармацевтичної, косметичної та інших галузей, де стабільність продукту є критично важливою.

Визначення ізоелектричної точки, при якій дзета-потенціал дорівнює нулю, дозволяє ідентифікувати умови, що сприяють дестабілізації системи. Це дає можливість розробляти стратегії для оптимізації рецептур та процесів, забезпечуючи максимальну стабільність продукту.

Використання дзета-потенціалу як інструменту контролю якості дозволяє оперативно виявляти відхилення від заданих параметрів,

що сприяє запобіганню виробничих дефектів та забезпеченню високої якості продукції.

Висновки. Дзета-потенціал є фундаментальною характеристикою міжфазної межі, що має вирішальне значення для стабілізації різноманітних дисперсних систем. Його величина та знак безпосередньо впливають на електростатичні сили відштовхування між частинками, запобігаючи їхній агрегації (коагуляції, флокуляції, коалесценції) та забезпечуючи стабільність колоїдних розчинів, суспензій, емульсій, пін та нанодисперсних систем. Розуміння механізмів впливу та контроль дзета-потенціалу є ключовими для розробки стабільних дисперсних систем з бажаними властивостями для широкого спектра застосувань.

Основні аспекти дзета-потенціалу:

- Ключовий параметр стабільності: дзета-потенціал – це головний параметр, що характеризує електростатичне відштовхування між частинками в дисперсній системі. Чим вище його значення, тим сильніше відштовхування, і, відповідно, вища стабільність системи.

- Прогнозування стабільності: вимірювання дзета-потенціалу дозволяє прогнозувати стабіль-

ність дисперсних систем, слугуючи індикатором їхньої схильності до агрегації або флокуляції.

- Фактори впливу та регулювання: на величину дзета-потенціалу впливає низка факторів, зокрема рН середовища та концентрація електролітів. Контроль цих факторів дає змогу регулювати стабільність дисперсних систем.

- Широке застосування: дзета-потенціал широко використовується в різних галузях промисловості (харчовій, фармацевтичній, косметичній тощо) для оптимізації рецептур, контролю якості продукції та прогнозування терміну придатності.

- Розуміння та контроль процесів: вимірювання дзета-потенціалу є важливим для розуміння та контролю механізмів диспергування, агрегації або флокуляції, що дозволяє покращити властивості колоїдних розчинів, емульсій та суспензій на етапах розробки та виробництва.

Загалом, дзета-потенціал є потужним інструментом для прогнозування та контролю стабільності дисперсних систем. Його використання дає змогу оптимізувати технологічні процеси, підвищити якість продукції та розширити можливості застосування дисперсних систем у різних сферах.

Список літератури:

1. Грабовська О.В., Ковалевська Є.І., Максимова І.М., Подобій О.В. Фізична і колоїдна хімія: навч. посіб. Київ: НУХТ, 2017. 327 с.
2. Ніколова М.П., Чавалі М.С. Металооксидні наночастинки як біомедичні матеріали. *Біоміметика*. 2020. 5 (2). Р. 2. <https://doi.org/10.3390/biomimetics5020027>
3. Sizochenko N., Mikolajczyk A., Syzochenko M., Puzyn T., Leszczynski J. Zeta potentials (ζ) of metal oxide nanoparticles: A meta-analysis of experimental data and a predictive neural networks modeling. *NanoImpact*. 2021. 22. Р. 100317. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100317>
4. Денг Л., Чен Л., Чжан Х., Ю Ч., Лю Х., Цю Ц., і Чжан Д. Роль дзета-потенціалу в наноліпосомах для доставки ліків: огляд. *Міжнародний журнал наномедицини*. 2022. 17. Р. 4667–4683. <https://doi.org/10.2147/IJN.S378122>
5. Лі Й., Кім С., Лі Д., Кім Х. Вплив дзета-потенціалу на стабільність наночастинок оксиду кремнію в водних розчинах. *Langmuir*. 2021. 37(37). Р. 10845–10853.
6. Hunter, R. J. Zeta potential in colloid science: principles and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 1993. 43. Р. 137–175. <https://doi.org/10.1007/BF02830128>
7. Pochapski, D. J., Dos Santos, C. C., Leite, G. W., Pulcinelli, S. H., & Santilli, C. V. (2021). Zeta Potential and Colloidal Stability Predictions for Inorganic Nanoparticle Dispersions: Effects of Experimental Conditions and Electrokinetic Models on the Interpretation of Results. *Langmuir*, 37(45), 13379–13389. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c02056
8. Ayala V., Herrera A. P., Latorre-Esteves M., Torres-Lugo M., Rinaldi C. Effect of surface charge on the colloidal stability and in vitro uptake of carboxymethyl dextran-coated iron oxide nanoparticles. *J Nanopart Res*. 2013. Vol. 15, No. 8. Р. 1874. DOI: 10.1007/s11051-013-1874-0.
9. Předota, M., Machesky, M. L., Wesolowski, D. J. Molecular Origins of the Zeta Potential. *Langmuir*. 2016. Vol. 32. No 40. Р. 10189–10198. DOI: 10.1021/acs.langmuir.6b02493.
10. Самойленко С.О., Отрошко Н.О., Аксьонова О.Ф., Добровольська О.В. Фізична та колоїдна хімія: навч. посіб. Харків: Світ Книг, 2024. 340 с.
11. Картель М., Лобанов В., Гороховатська М. Курс фізичної хімії. Київ: ТОВ «НВП «Інтерсервіс», 2011. 386 с.
12. Wu M., He X., Feng D. et al. The Emulsifying Properties, In Vitro Digestion Characteristics and Storage Stability of High-Pressure-Homogenization-Modified Dual-Protein-Based Emulsions. *Foods*. 2023. 12 (22). Р. 4141. <https://doi.org/10.3390/foods12224141>

13. Fillipi M.V., Genovese D.B., Lozano J.E. Zeta-Potential as a Way to Determine Optimal Conditions During Fruit Juice Clarification. *Food Engineering: Integrated Approaches*. 2008. P. 391–397. DOI:10.1007/978-0-387-75430-7_29
14. Пилипенко Т., Рябчук Ю., Єфімова В. Дослідження якості косметичних кремів для рук. *Технічні науки та технології*. 2017. №4 (10). С. 210–216. DOI: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-210-216
15. Пилипенко Т.М., Єфімова В.Г., Денисюк І.В. Дослідження фізико-хімічних характеристик косметичних рідин для обличчя. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69). Ч. 2. С. 67–71. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-2/11>
16. Lee S.J., Han S.R., Jeong J.H., Kim J.D. Effects of Oil type on the Stability of Oil-in-Water Lipid Nanoemulsion. *J. of Korean Oil Chemists Soc.* 2016. Vol. 33. No 4. P. 667–675. <http://dx.doi.org/10.12925/jkocs.2016.33.4.667>
17. Kulkarni N.S., Ranpise N.S., Rathore D.S., Dhole S.N. Characterization of Self-Microemulsifying Dosage Form: Special Emphasis on Zeta Potential Measurement. *International. Journal of Pharmaceutical & Biological Archives*. 2019. Vol. 10. Issue 3. P. 172–179.
18. Bhatt N., Prasad R.K., Singh K., Panpalia G.M. Stability study of O/W emulsions using zeta potential. *J. Chem. Pharm. Res.* 2010. 2 (1). P. 512–527.
19. Soheyla H., Foruhe Z. Effect of Zeta Potential on the Properties of Nano-Drug Delivery Systems – A Review (Part 2). *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*. 2013. 12 (2). P. 265–273. <http://dx.doi.org/10.4314/tjpr.v12i2.20>
20. Mfon R.E., Amri Z.A. Synthesis, Characterisation and Zeta Potential of Silver Nanoparticles. *American Journal of Sciences and Engineering Research*. 2023. Volume 6. Issue 1. P. 104–112.
21. Душкін С.С. Підвищення екологічної безпеки при підготовці питної води з використанням модифікованого кварцового завантаження фільтруючих матеріалів. *Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»*. 2019. 6 (2). С. 54–59.
22. Ordaz-Diaz L.A., Valle-Cervantes S., Rodriguez-Rosales J. Wastewater Internal Treatment for Recirculation in the Pulp and Paper Process. *BioResources*. 2017. 12 (3). P. 5953–5969.

Petrenko T.V., Kovalova S.O., Makarenko O.H., Mayboroda O.I. ZETA POTENTIAL AS A STABILITY FACTOR OF DISPERSED SYSTEMS

Dispersed systems, including colloidal solutions, suspensions, emulsions, and foams, are critical components in numerous technological processes and are widely used in the food, pharmaceutical, cosmetic industries, as well as in water treatment. However, their thermodynamic instability – the tendency towards spontaneous aggregation, sedimentation, or coalescence – is a major challenge that directly limits the quality, functional properties, and shelf life of final products.

One of the fundamental parameters determining the stability of these heterogeneous systems is the zeta potential (ζ -potential). It represents the potential difference at the plane of shear of the electrical double layer (EDL) and serves as a measure of the strength of electrostatic repulsion between dispersed particles. The magnitude of the ζ -potential is a reliable indicator of the dispersed system's resistance to destabilization processes such as aggregation or flocculation.

This article presents a comprehensive analysis of the role of ζ -potential in the stabilization of various dispersed systems based on current scientific research. The specifics of its influence on different types of systems are examined:

- Lyophobic Colloids: A high absolute value of ζ -potential (typically $>|25-30|$ mV) creates a significant energy barrier, which is the main mechanism for preventing coagulation and flocculation.*
- Suspensions: The ζ -potential is essential for maintaining homogeneity, as electrostatic repulsion prevents the agglomeration of particles that would otherwise accelerate sedimentation.*
- Emulsions: A significant ζ -potential creates repulsion between the dispersed droplets, which is key to preventing their merging (coalescence).*
- Foams: The charged surfaces of the liquid films create electrostatic repulsion that counteracts their thinning and enhances the foam's stability.*
- Nanodispersed Systems: Due to their high specific surface area, a high absolute ζ -potential is critically important for ensuring strong repulsion and preventing aggregation of nanoparticles.*

The key factors that most influence the magnitude of the ζ -potential, including medium pH and electrolyte concentration, are analyzed. An increase in the concentration of electrolyte ions leads to the compression of the diffuse layer of the EDL and, consequently, to a decrease in the ζ -potential. It is established that the influence of ions on the ζ -potential increases rapidly with their valency, especially for ions whose charge is opposite to that of the colloidal particle.

It is shown that a critical pH value exists, called the isoelectric point (IEP), at which the surface charge of the particles and, consequently, the ζ -potential is equal to zero. The IEP represents the point of lowest stability of the system, as electrostatic repulsion is absent. Therefore, a high absolute value of the ζ -potential, regardless of the sign of the charge, is crucial for ensuring effective repulsion and preventing aggregation.

The broad practical application of ζ -potential control in industry is highlighted: for formulation optimization, quality control of raw materials and finished products, and for shelf-life prediction. Specifically, in pharmaceuticals, it allows for increased bioavailability of drugs, and in cosmetics – for controlling texture and the penetration of active ingredients.

Thus, the ζ -potential is a powerful and fundamental tool for predicting, understanding, and actively controlling the stability of dispersed systems, which significantly increases the technological efficiency of production and improves the quality of final products across various industries.

Key words: zeta potential, dispersed systems, stability, emulsions, suspensions, colloids, nanoparticles, aggregation, flocculation, coalescence, electrostatic repulsion.

Дата надходження статті: 21.09.2025

Дата прийняття статті: 15.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Портянко Т.М.

Черкаський державний технологічний університет

Богатирьова О.О.

ТОВ «ЦЕНТР СЛУЖБИ КРОВІ «БІОФАРМА ПЛАЗМА»

МЕТОДИКА ПІДГОТОВКИ ВОДИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОЇ РОБОТИ БІОХІМІЧНОГО АНАЛІЗАТОРА COBAS 800 (НА ПРИКЛАДІ ДІАГНОСТИЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ ТОВ «ЦЕНТР СЛУЖБИ КРОВІ «БІОФАРМА ПЛАЗМА»)

Якість води є критичним чинником, що визначає аналітичну стабільність і точність у сучасних діагностичних і клінічних лабораторіях. Це особливо важливо для високоавтоматизованих платформ, таких як модульний біохімічний аналізатор cobas® 8000, де навіть незначні відхилення у параметрах води можуть призвести до зміни початкових значень, інтерференцію у фотометричних вимірюваннях і коливання результатів при роботі з іоноселективними електродами, що, своєю чергою, знижує відтворюваність і діагностичну надійність.

У статті обґрунтовано необхідність використання води, яка відповідає міжнародним стандартам – CLRW (Clinical Laboratory Reagent Water) або, за можливості, ASTM Type I (ультрачиста вода) – як основи для формування достовірної аналітичної бази без похибок, спричинених забруднювачами хімічного чи мікробного походження.

Проведено аналітичний огляд нормативних документів (CLSI GP40, ASTM D1193, ISO 3696), технічних специфікацій Roche Diagnostics і сучасних публікацій у галузі. Аналіз показав, що вимоги до деіонізованої, бактерійно чистої води з низькою електропровідністю, які висуваються для платформ cobas, функціонально відповідають стандарту CLRW, тоді як методики, чутливі до органічних домішок, отримують переваги від використання води типу ASTM Type I.

Представлено технологічну схему водоочищення з багатобар'єрним захистом, що включає: механічну та вугільну фільтрацію, опціональне пом'якшення, зворотний осмос, електродеіонізацію, УФ-обробку (185/254 нм) для зменшення рівня TOC (загального органічного вуглецю) та мікробного контролю, а також фінальну стерильну фільтрацію (0,22 мкм).

Особливу увагу приділено зберіганню та рециркуляції води: використання бака з конічним дном із нержавної сталі, оснащеного стерильними повітряними фільтрами, турбулентна циркуляція води для запобігання застою, регулярна термічна або хімічна санітарна обробка з підтвердженою ефективністю.

Розроблено внутрішній алгоритм контролю якості, який включає: щоденний онлайн-моніторинг питомого опору, щомісячне вимірювання TOC, мікробіологічний аналіз та документування коригувальних дій (CAPA).

Вплив якості води на аналітичну надійність оцінюється через аналіз тенденцій контролю якості, стабільність калібрувальних параметрів, коефіцієнти варіації та відповідність правилам Вестгарда.

Впровадження цієї методології підвищує експлуатаційну надійність системи cobas® 8000, зменшує кількість діагностичних помилок, оптимізує витрати на обслуговування та забезпечує відповідність принципам GLP/GMP і вимогам до простежуваності.

Ключові слова: біохімічний аналізатор cobas® 8000, іонізована вода, деіонізована вода, підготовка води, якість лабораторної води, чистота води, лабораторний контроль якості, діагностична лабораторія, стабільність аналітичних результатів.

Постановка проблеми. Якість води є одним із ключових факторів стабільності та точності вимірювань на високопродуктивних аналітичних платформах, зокрема на модульній системі cobas® 8000 [1, с. 45–46; 2, с. 12–14]. Іони, орга-

нічні домішки та мікробіологічне забруднення можуть обумовлювати відхилення контрольної точки, похибки фотометричних вимірювань та нестабільність визначення концентрацій електролітів (Na^+ , K^+ , Cl^-) за допомогою іоноселективних

електродів. Виробники та профільні організації вимагають використовувати у лабораторній діагностиці деіонізовану, бактеріально чисту воду щонайменше рівня CLRW (Clinical Laboratory Reagent Water) [3, с. 10–12], а для досліджень з підвищеними вимогами до точності – ASTM Type I (ультрачиста вода) [4, с. 2–3]. В окремих системах Roche у технічній документації прямо визначено відповідність CLRW; у технічних характеристиках систем cobas передбачено застосування деіонізованої води, вільної від бактеріальної контамінації з низькою електропровідністю, що функціонально узгоджується з CLRW.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Керівництво CLSI GP40 (CLRW) визначає базові граничні величини для води, призначеної для діагностичних/клінічних лабораторій: електричний опір (резистивність) $\geq 10 \text{ M}\Omega \cdot \text{см}$ при 25°C (такий рівень означає практичну відсутність іонів у воді) [3, с. 15–16], бактерій $< 10 \text{ КУО/мл}$, кінцевий фільтр $0,22 \text{ мкм}$, загальний органічний вуглець (TOC) $< 500 \text{ ppb}$. Стандарти ASTM [4, с. 5–6] та ISO [5, с. 3–4] додатково наводять класифікацію води та специфікації для різних рівнів чистоти. У технічних матеріалах Roche для інших систем зазначаються прямі посилання на CLRW, що підтверджує прийнятність цих нормативів для серії cobas [1, с. 52].

Керівництво CLSI C3 (CLRW) визначає базові граничні величини для води, призначеної для клінічних лабораторій: резистивність $\geq 10 \text{ M}\Omega \cdot \text{см}$ (при 25°C), бактерій $< 10 \text{ КУО/мл}$, кінцева мембрана $0,22 \text{ мкм}$, TOC $< 500 \text{ ppb}$ (або узгоджено з вимогами конкретного виробника). Низка профільних оглядів підкреслює: у випадку аналізаторів виробничі специфікації мають пріоритет над мінімальними вимогами CLRW. Стандарти ASTM D1193 класифікують воду типів I–IV; Type I (ультрачиста) має резистивність $18,2 \text{ M}\Omega \cdot \text{см}$ та TOC $\leq 50 \text{ ppb}$ і використовується для найкритичніших аналітичних процедур. Стандарт ISO 3696 також описує вимоги до лабораторної води (Grade 1–3). У технічних специфікаціях Roche для інших систем цього виробника вказується вимога, щодо використання деіонізованої, мікробіологічно чистої води, а також наводяться посилання на стандарт CLRW, як орієнтир для якості деіонізованої води (Deionized water), (далі, DI-води), що свідчить про узгодженість цих нормативів із серією приладів «cobas».

Стабільна робота біохімічного аналізатора cobas® 8000 безпосередньо залежить від якості води. Деіонізована вода рівня CLRW є мінімаль-

ною вимогою [3], тоді як для найбільш чутливих досліджень рекомендована ASTM Type I [4]. Використання багатоступеневих технологій підготовки води та регулярний моніторинг її параметрів (резистивність, TOC, мікробіологія та інші) забезпечують відповідність аналітичних результатів міжнародним стандартам [6–9].

Метою статті є сформулювати практичну методику підготовки, контролю та валідації деіонізованої води для стабільної роботи модульного аналізатора cobas® 8000, узгоджену з вимогами Clinical Laboratory Reagent Water CLRW/American Society for Testing and Materials ASTM та типовими рекомендаціями виробника; запропонувати алгоритм внутрішньолaboratorного моніторингу якості води та її впливу на аналітичні показники [1, с. 45–46; 3, с. 10–16; 4, с. 2–6].

Виклад основного матеріалу. Товариство з обмеженою відповідальністю «ЦЕНТР СЛУЖБИ КРОВІ «БІОФАРМА ПЛАЗМА» (далі – ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА»») є сучасним закладом служби крові, який спеціалізується на заготівлі, тестуванні, переробці та зберіганні донорської крові та її компонентів і налічує на даний час 16 відділень заготівлі крові та її компонентів по всій Україні. Основними напрямками діяльності центру є:

- забезпечення безпеки донорства шляхом ретельного лабораторного контролю, включаючи скринінг на гемотрансмісивні інфекції (ВІЛ, гепатити В і С, сифіліс та ін.);
- переробка донорської крові з виділенням плазми, еритроцитарної маси та тромбоцитарних концентратів, що використовуються у трансфузійній медицині;
- підтримка національної системи охорони здоров'я через постачання компонентів крові та плазми для лікування пацієнтів із тяжкими станами (кровотечі, анемії, онкогематологічні та імунологічні захворювання);
- забезпечення сировиною фармацевтичного виробництва (заводу – фракціонатора) для виготовлення препаратів плазми (альбуміну, імуноглобулінів, факторів згортання тощо).

ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» функціонує відповідно до міжнародних стандартів GMP (Good Manufacturing Practice) та GLP (Good Laboratory Practice), активно впроваджує сучасні технології тестування (у тому числі автоматизовані системи Roche Diagnostics) і сприяє розвитку культури донорства в Україні.

Діагностична лабораторія є структурним підрозділом ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» та

функціонує у відділенні заготівлі крові та її компонентів ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси. Одним із видів лабораторного контролю, який проводить діагностична лабораторія є контроль гемотрансмісивних інфекцій, що є одним із ключових етапів забезпечення безпеки донорства крові та її компонентів. Донорська кров може бути потенційним джерелом передачі небезпечних патогенів – зокрема вірусів імунодефіциту людини (ВІЛ), гепатитів В та С, сифілісу та інших інфекцій, які мають високий ризик трансмісії під час переливання. Оскільки навіть незначна кількість інфікованих клітин чи плазми може становити загрозу для реципієнта, ретельний лабораторний скринінг кожного донора є обов'язковою умовою. Особливе значення це має при використанні компонентів крові (плазми, еритроцитів, тромбоцитів), адже вони застосовуються для лікування пацієнтів із тяжкими станами – кровотечами, онкогематологічними захворюваннями, імунодефіцитами. Наявність ефективної системи виявлення гемотрансмісивних інфекцій значно знижує ризик інфекційних ускладнень, підвищує довіру до служби крові та відповідає міжнародним стандартам трансфузійної безпеки (World Health Organization, Європейський директиви, Food and Drug Administration).

В діагностичній лабораторії всі лабораторні дослідження крові та її компонентів проводяться згідно вимог нормативних документів. Порядок контролю за дотриманням показників безпеки та якості донорської крові та її компонентів розроблений та виконується згідно із розділом IV та статтею 15 Закону України «Про безпеку та якість донорської крові та компонентів» від 15.12.2021 року №1962 ІХ, згідно із розділом II та статтями 6, 7, 8 Закону України «Про протидію поширенню хвороб, зумовлених вірусом імунодефіциту людини (ВІЛ), та правовий і соціальний захист людей, які живуть з ВІЛ» від 12.12.1991 року №1973-ХІІ (зі змінами від 12.01.2023 № 2869-ІХ), Настанови СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2020. «Лікарські засоби. Належна виробнича практика», Наказу МОЗ України від 09.03.2010 № 211 (у редакції наказу МОЗ України від 02 травня 2023 року № 818) «Порядок дотримання показників безпеки та якості донорської крові та компонентів крові»), відповідно Державної Фармакопеї України, 2 видання, 1 том, 2015 року, Наказу МОЗ України від 19.02.2013 р. № 134 «Про затвердження Порядку скринінгу донорської крові та її компонентів на гемотрансмісивні інфекції», Наказу МОЗ України від 01.08.2005 року № 385

(у редакції наказу МОЗ України від 08.02.2021 року № 207) «Порядок медичного обстеження донорів крові та компонентів крові». В діагностичній лабораторії проводять серологічні дослідження на наявність маркерів трансфузійно-трансмісивних інфекцій (ВІЛ-інфекція, вірусні гепатити В і С, сифіліс) з використанням електрохемилюмінесцентного методу (з міченими антитілами та антигенами). Дослідження зразків сироватки/плазми донорської крові проводиться за допомогою аналізатора cobas® 8000 (Roche Diagnostics) та у відповідності до внутрішньої документації – стандартних операційних процедур (далі – СОП) системи менеджменту якості (далі – СМЯ) ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА». Аналізатор cobas® 8000 (Roche Diagnostics) є високопродуктивною системою для виконання широкого спектра біохімічних та імунохімічних досліджень. Roche Diagnostics є одним із провідних підрозділів міжнародної компанії F. Hoffmann-La Roche Ltd. (Швейцарія), що спеціалізується на розробці та впровадженні високотехнологічних рішень для лабораторної та клінічної діагностики. Особливе місце займають модульні аналітичні платформи лінійки cobas®, які завдяки високій пропускній здатності та стандартизації реагентів забезпечують комплексний підхід до лабораторного скринінгу, у тому числі контролю гемотрансмісивних інфекцій. Roche встановлює чіткі технічні вимоги до експлуатаційних умов своїх систем, зокрема до якості води (відповідність стандартам CLRW або ASTM Type I), що підкреслює значущість допоміжних ресурсів у досягненні відтворюваності та точності результатів. Таким чином, Roche Diagnostics виступає глобальним лідером у сфері лабораторної медицини, поєднуючи інноваційні технології з практичною орієнтацією на забезпечення безпеки пацієнтів і донорства.

Завдяки модульній структурі cobas® 8000 (Roche Diagnostics), яка використовується у діагностичній лабораторії ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси є можливим поєднувати рутинні біохімічні тести з імуноаналізами, зокрема на визначення маркерів гемотрансмісивних інфекцій (ВІЛ, гепатити В і С, сифіліс). Така інтеграція дає можливість здійснювати ефективний лабораторний контроль донорської крові та плазми, що є ключовим для підвищення безпеки трансфузій. Висока пропускна здатність приладу (до 1500 зразків крові та її компонентів за добу) забезпечує оперативність обстеження великої кількості донорів, а стандартизація реагентів Roche гарантує високу точність та відтворюва-

ність результатів. Cobas® 8000 виступає важливим інструментом у комплексній системі скринінгу донорської крові та профілактики передачі гемотрансмісивних інфекцій.

Для забезпечення високої точності та відтворюваності результатів аналізів на біохімічному аналізаторі cobas® 8000 необхідним є використання спеціально підготовленої деіонізованої (ультрачистої) води. Саме якість води визначає стабільність фотометричних вимірювань, коректність роботи іоноселективних електродів (ISE) та відсутність фонового забруднення, що може призвести до хибних результатів. Наявність у воді навіть мінімальних домішок – іонів, органічних сполук чи мікробіологічних контамінантів – здатна викликати зміщення базових значень, коливання фону та похибки у визначенні маркерів. Тому система підготовки і контролю води є критично важливим компонентом у надійній роботі cobas® 8000. Вимоги до якості води встановлено технічними специфікаціями виробника. Обов'язкові мінімальні критерії для води рівня CLRW: резистивність $\geq 10 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ (25 °C), бактерії $< 10 \text{ KVO/мл}$; кінцевий фільтр 0,22 мкм; TOC $< 500 \text{ ppb}$ [3, р. 15–16]. Рекомендовані критерії для найбільш чутливих методик – ASTM Type I: $18,2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$; TOC $\leq 50 \text{ ppb}$ [4, р. 2–3].

На практиці у ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси для експлуатації cobas® 8000 в діагностичній лабораторії використовується ультрачиста вода (ASTM Type I), а система підготовки води забезпечує досягнення показника TOC 5-10 ppb.

Водопостачання ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси здійснюється із централізованої системи господарсько-питного водопостачання м. Черкаси. Для забезпечення надійної роботи аналізатора cobas® 8000 у діагностичній лабораторії ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси розроблена технологічна схема підготовки води, яка включає ряд стадій: попереднього очищення (pre-treatment), основної деіонізації (RO, EDI), полірування (ультрафільтрація, УФ-обробка) та рециркуляції з кінцевою фільтрацією 0,22 мкм [6; 7; 8]. Система додатково передбачає регулярну санітацію (термічну або хімічну), що відповідає міжнародним вимогам якості води [9]. У ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси проводиться хімічна санітація.

Стадія попереднього очищення (pre-treatment). Попереднє очищення є критично важливим етапом у підготовці води, оскільки воно забезпечує захист мембран зворотного осмосу, іонообмін-

них смол та електродеіонізаційних модулів від передчасного зносу. На цьому етапі усуваються механічні домішки, хлор, хлораміни, органічні забруднення та солі жорсткості. Основні елементи pre-treatment:

- механічна фільтрація – встановлені фільтри грубого та тонкого очищення (від 5 мкм до 1 мкм), які затримують пісок, іржу, колоїдні частинки. Це перешкоджає забиванню мембран RO;

- активоване вугілля (встановлений блок-фільтри – усуває хлор і хлораміни, які є токсичними для мембран зворотного осмосу, а також адсорбує органічні домішки;

- пом'якшення води (встановлені іонообмінні картриджі) застосовуються для запобігання утворенню накипу на мембранах.

Основна деіонізація. Ця стадія є фундаментальною для досягнення рівня чистоти, необхідного для роботи високочутливих аналітичних платформ, яким є cobas® 8000, що використовується у діагностичній лабораторії ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси. На цьому рівні відбувається максимальне видалення розчинених солей, іонів та залишкових домішок, що залишилися після стадії попереднього очищення. Мета – досягнення рівня чистоти, який відповідає вимогам CLRW або ASTM Type I.

Зворотний осмос (RO) – базова технологія, що затримує 95–99% розчинених солей і органіки. У ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси функціонує система високої продуктивності та застосовується двоступеневий RO для покращеного очищення.

Наступною стадією у підготовці води у ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси є електродеіонізація (EDI) – це є сучасна технологія, яка поєднує іонообмін та електричне поле, дозволяючи безперервно видаляти іони та підтримувати резистивність води на рівні $> 15\text{--}18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$. EDI практично витіснила класичний іонообмін у багатьох лабораторних системах завдяки безперервному режиму роботи та відсутності необхідності регенерації смол. Результатом стадії є видалення більшості неорганічних солей та провідних іонів зниження TDS на 95–99%. Зниження електропровідності до $\leq 0,1 \text{ }\mu\text{S/см}$ (еквівалент резистивності $\geq 10 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$).

Після стадії основної деіонізації вода має високий рівень чистоти за іонним складом, але може все ще містити органічні домішки, залишковий TOC, ендотоксини чи мікробіологічні контамінанти. Тому необхідне додаткове «полірування» та контроль мікробіологічної безпеки. На

ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси проводиться ультрафільтрація (UF, 10–20 кДа) – метод мембранного очищення води, при якому мембрана затримує молекули з молекулярною масою понад 10–20 тисяч дальтонів (наприклад, білки, ендотоксини та мікробні компоненти), що є важливим у випадку проведення імунохімічних та молекулярних тестувань.

Завершальною та обов'язковою ланкою у ланцюгу підготовки води для лабораторного обладнання cobas® 8000, що гарантує стабільність і відтворюваність результатів є УФ-окиснення 185/254 нм (для зниження ТОС, знезараження).

Після проходження всіх етапів очищення вода на ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси надходить у бак (з нержавіючої сталі 316L), який обладнаний конічним дном для повного зливу та стерильним повітряним фільтром (0,22 мкм), з якого постійно циркулює по контуру. Для забезпечення безперервного руху води зі швидкістю ≈ 1.5 м/с у магістралі, що є достатньою для запобігання застою, використовується циркуляційний насос та трубопроводи (з нержавіючої сталі з полірованою внутрішньою поверхнею). Частина води подається на точки відбору і безпосередньо в прилад (cobas® 8000), решта повертається назад у бак. У процесі циркуляції вода проходить через УФ-лампи та кінцеву стерильну фільтрацію, що запобігає розвитку мікроорганізмів і утворенню біоплівки. Кінцева стерильна фільтрація (0,22 мкм) запобігає потраплянню бактерій та частинок у внутрішні канали аналізатора. Для підтримки безперервного руху води, не допускаючи її застою, що мінімізує утворення біоплівки, застосовується система рециркуляції (на практиці це ≥ 4 обороти/год). Для цього процесу створена рециркуляційна петля з санітарного матеріалу (нержавіюча 316L) із безперервною циркуляцією. Система рециркуляції є останнім бар'єром, що зберігає якість води від моменту очищення до її використання в аналізаторі, і без неї неможливо гарантувати стабільну роботу таких високоточних систем, як cobas® 8000.

Також проводиться хімічна санітизація (санітарна обробка хімічними засобами): раз на 3 місяці або після виявлення підвищеної мікробної контамінації (за результатами мікробіологічного контролю). У контур вводять дезінфікуючий розчин – перекис водню (H_2O_2 , 3%), який контактує з поверхнями трубопроводів та баків протягом певного часу (зазвичай 30–120 хв). Потім систему ретельно промивають підготовленою водою до повного видалення залишків реагентів. Регу-

лярна санітизація контуру потрібна, як ключовий захід у підтримання високої якості деіонізованої води, без якої неможлива стабільна робота біохімічних аналізаторів, зокрема cobas® 8000.

На ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси споживання DI-води системою cobas® 8000 суттєво залежить від інтенсивності експлуатації – від базових 10–20 л/добу у режимі простою до понад 100 л/добу при максимальному завантаженні (>1000 –1500 зразків). Тому ще в процесі проектування системи водопідготовки було закладено резерв продуктивності +30% від середньодобових потреб. Це дозволяє компенсувати пікові навантаження, додаткові промивання після технічного обслуговування або санітизації, а також забезпечити стабільну роботу аналізатора без ризику перебоїв у подачі DI-води.

На ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси проводиться операційний контроль якості DI-води в режимі online/offline. При онлайн-моніторингу (безперервному) контролюється: резистивність (компенсована до 25 °C), температура, тиск, витрата у петлі. При періодичному контролі (офлайн) визначається: ТОС (щомісяця або після сервісного обслуговування), мікробіологічні показники (посів на R2A (Reasoner's 2A agar)/стандартні поживні середовища 1×/тиждень – 1×/місяць; ціль <10 КУО/мл (CLRW)). За потреби контролюється показник каламутності та проводиться огляд фільтрів. Контроль за показником ендотоксини у ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси не проводиться. Всі результати фіксуються у відповідних формах запису і у відповідності до затверджених процедур (СОП).

Точки відбору проб є: бак, зворотна лінія петлі, точка безпосередньо перед аналізатором. Межі прийнятності DI-води авторами вже приводились вище.

Технічне обслуговування системи підготовки води залежить від навантаження та вимог розроблених процедур СМЯ. Проводиться щоквартально – це заміна картриджів механічної та вугільної фільтрації, перевірка УФ-ламп. Раз на 6–12 місяців – профілактична заміна ключових вузлів (УФ-ламп, стерильних фільтрів 0,22 мкм), калібрування датчиків, проведення повної хімічної санітарної обробки з валідацією. Щороку – повний сервіс від авторизованого сервісного центру, із протоколом технічного стану.

У відповідності до вимог СМЯ ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» та відповідних СОП проводиться протоколювання всіх проведених

робіт з фіксацією параметрів, а в разі виявлених відхилень формується заявка на відхилення та за необхідності коригувальні та запобіжні дії (далі, CAPA). В разі неможливості відразу встановити причину відхилення проводиться розслідування виявленого відхилення у відповідності до вимог СОП.

Для документального підтвердження процесу, який доводить, що обрана технологічна схема (pre-treatment → RO → EDI → УФ → фільтрація 0,22 мкм → рециркуляція) забезпечує отримання води, яка відповідає встановленим критеріям (CLRW/ASTM Type I) на ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси проводиться валідація системи водопідготовки. Проведення усіх стадій (IQ, OQ, PQ) валідації процесу водопідготовки гарантує, що вхідна якість води (з централізованого водопостачання) перетворюється на вихідну якість, придатну для аналізатора. Підтверджує, що критичні параметри (резистивність ≥ 10 МΩ·см, ТОС ≤ 500 –50 ppb, бактерії < 10 КУО/мл) стабільно досягаються. Дає змогу перевірити, чи впливає вода на роботу приладу: стабільність фотометричного «бланку»; відсутність дрейфу ISE-електродів; достовірність результатів QC за правилами Вестгарда.

Для регулярного підтвердження, що система після введення в експлуатацію продовжує працювати у межах специфікацій проводиться верифікація. В процесі верифікації перевіряють ключові параметри води (резистивність, ТОС, мікробіологію) за встановленим графіком. Оцінюють вплив на результати аналізатора (QC-проби, контроль калібрувань ISE, коефіцієнти варіації). Проводиться перевірка форм записів, що підтверджує виконання операцій, а саме: журналів санітазації, заміни картриджів, сервісних робіт. Це дозволяє вчасно виявити тренди погіршення якості (наприклад, поступове зростання ТОС чи мікробного навантаження). Проведення валідації та верифікації є критично саме для cobas® 8000, тому, що це високопродуктивна модульна сис-

тема, яка щоденно виконує сотні тестів у діагностичній лабораторії і будь-яке відхилення у якості води призводить до масових похибок у результатах. Валідація гарантує, що система стартує правильно, а верифікація – що вона залишається стабільною протягом усього життєвого циклу. Без цього неможливо забезпечити відповідність GLP/GMP та вимогам регуляторів (МОЗ, FDA, ISO 15189).

Для стабільної роботи cobas® 8000 та для впевненості, що система підготовки води функціонує у контрольованих межах і дає достовірні результати навіть при високому навантаженні на ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси вбудований комплекс автоматичних програмних і технічних рішень. Наприклад, система промивань, що здійснює автоматичне очищення внутрішніх каналів після аналізів та захищає від перехресного забруднення проб, знижує ризик інтерференцій, підвищує чистоту вимірювань; моніторинг реагентів; контроль терміну придатності; що в цілому гарантує відповідність GLP/GMP та відтворюваність результатів.

Висновки. Біохімічний аналізатор cobas® 8000, який експлуатується в діагностичній лабораторії ТОВ «ЦСК «БІОФАРМА ПЛАЗМА» м. Черкаси є високопродуктивною модульною системою, здатною виконувати сотні тестів на годину, включно з визначенням маркерів гемотрансмисивних інфекцій, біохімічних показників. Така інтенсивність роботи потребує не лише стабільного технічного забезпечення, а й бездоганної якості реагентів і допоміжних ресурсів, зокрема деіонізованої (ультрачистої) води. Наявність навіть мінімальних іонних чи органічних домішок у воді може спричиняти зміщення базових значень, та похибки фотометричних вимірювань, що безпосередньо впливають на достовірність результатів. Тому система підготовки та контролю води є невід'ємною частиною експлуатації cobas® 8000 і гарантією його стабільної роботи у діагностиці та скринінгу донорської крові.

Список літератури:

1. Roche Diagnostics. Cobas® 8000 modular analyzer series. Operator's Manual. Mannheim: Roche Diagnostics, 2020. 512 с.
2. Roche Diagnostics. Cobas® 6000 analyzer series. Water and Waste Requirements. Mannheim: Roche Diagnostics, 2019. 48 с.
3. Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). Preparation and Testing of Reagent Water in the Clinical Laboratory (CLSI GP40, 5th ed.). Wayne, PA: CLSI, 2024. 68 с.
4. ASTM International. ASTM D1193-19: Standard Specification for Reagent Water. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. 12 с.
5. International Organization for Standardization. ISO 3696:1987 Water for analytical laboratory use – Specification and test methods. Geneva: ISO, 1987. – 9 с.

6. Lorch W. (ed.). Handbook of Water Purification. 2nd ed. Chichester: Ellis Horwood, 1987. 784 с.
7. GE Osmonics. The Pure Water Handbook. 2nd ed. Minnetonka, MN: Osmonics, 2002. 152 с.
8. ELGA LabWater. Pure LabWater Guide. Veolia Water Technologies, 2018. 76 с.
9. Sigma-Aldrich (Merck). Water for Clinical Chemistry. Technical Bulletin. Darmstadt: Merck KGaA, 2020. 24 с.

Portianko T.M., Bohatyriova O.O. METHODOLOGY OF WATER PREPARATION FOR ENSURING STABLE OPERATION OF THE COBAS® 8000 BIOCHEMICAL ANALYZER (CASE STUDY OF THE DIAGNOSTIC LABORATORY LLC “BLOOD SERVICE CENTER “BIOFARMA PLASMA”)

Water quality is a critical factor determining analytical stability and accuracy in modern diagnostic and clinical laboratories. This is particularly important for highly automated platforms such as the modular biochemical analyzer cobas® 8000, where even minor deviations in water parameters may result in baseline shifts, photometric interferences, and fluctuations in ion-selective electrode measurements, thereby reducing reproducibility and diagnostic reliability.

The article substantiates the necessity of using water that complies with international standards – CLRW (Clinical Laboratory Reagent Water) or, when possible, ASTM Type I (ultrapure water) – as the basis for forming a reliable analytical background free from errors caused by chemical or microbiological contaminants.

An analytical review of regulatory documents (CLSI GP40, ASTM D1193, ISO 3696), Roche Diagnostics technical specifications, and recent publications in the field was conducted. The analysis demonstrated that the requirements for deionized, bacteria-free water with low conductivity specified for cobas platforms are functionally aligned with CLRW standards, whereas methods highly sensitive to organic impurities benefit from ASTM Type I water.

A technological water purification scheme with multi-barrier protection is presented, including mechanical and carbon filtration, optional softening, reverse osmosis, electrodeionization, UV treatment (185/254 nm) for reducing TOC (total organic carbon) and microbial load, as well as final sterile filtration (0.22 µm).

Special attention is given to water storage and recirculation: the use of a stainless-steel conical-bottom tank equipped with sterile air filters, turbulent circulation to prevent stagnation, and regular thermal or chemical sanitization with proven effectiveness.

An internal quality control algorithm was developed, including daily online monitoring of specific resistance, monthly TOC measurement, microbiological analysis, and documentation of corrective and preventive actions (CAPA).

The impact of water quality on analytical reliability is assessed through quality control trend analysis, stability of calibration parameters, coefficients of variation, and compliance with Westgard rules.

Implementation of this methodology increases the operational reliability of the cobas® 8000 system, reduces diagnostic errors, optimizes maintenance costs, and ensures compliance with GLP/GMP principles and traceability requirements.

Key words: *biochemical analyzer cobas® 8000, ionized water, deionized water, water purification, laboratory water quality, ultrapure water, quality control, diagnostic laboratory, analytical stability.*

Дата надходження статті: 20.09.2025

Дата прийняття статті: 05.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Степанова Д.С.Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Майзеліс А.О.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО
МУЛЬТИШАРОВОГО ПОКРИТТЯ [(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{доп}]_n-MWCNT**

Статтю присвячено аналізу впливу багатостінних вуглецевих нанотрубок (MWCNT) на процес електроосадження і корозійні властивості покриттів на основі сплавів мідь-цинк. Використано методи циклічної вольтамперометрії з затримкою розгортки потенціалу, двохімпульсний гальваностатичний метод формування мультишарових покриттів і поляризаційний метод дослідження корозійних властивостей. На підставі аналізу циклічних вольтамперних залежностей з різною межею сканування потенціалів виявлено, що покриття, отримані при низьких густинах струму в вихідному пірофосфатно-цитратному електроліті для осаження сплаву Cu-Zn містять вільну мідь і α -фазу сплаву, твердий розчин цинку в міді. При підвищенні густини струму осаження в α -фазі сплаву збільшується вміст цинку і з'являються фази, збагачені цинком. Показано, що введення в пірофосфатно-цитратний електроліт вуглецевих нанотрубок сумісно зі стабілізуючою поверхнево-активною речовиною не впливає на механізм співосаження міді з цинком, але збільшення концентрації ПАР знижує швидкість катодного процесу при збільшенні вмісту цинку в покритті. Встановлено, що в умовах перемішування катодний процес прискорюється, і в надграничній області потенціалів катодний осад має розвинену структуру.

Порівняно хронопотенціограми формування в однакових умовах мультишарового [(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{доп}]_n і композиційного [(Cu-Zn)_{баз}/(Cu-Zn)_{доп}]_n-MWCNT покриттів: базові шари осадили в умовах перемішування при густині струму 12 мА/см², додаткові шари – при густині струму 40 мА/см². Виявлено, що при тривалому електролізі площа поверхні композиційного покриття поступово збільшується, покриття збагачується міддю. За рахунок більшого вмісту позитивної міді потенціал корозії композиційного покриття є на 60 мВ більшим за потенціал корозії мультишарового покриття. Але за рахунок його більшої реальної площі поверхні і меншого поляризаційного опору він має більшу швидкість корозії.

Ключові слова: сплав мідь-цинк, багатошарові вуглецеві нанотрубки, мультишарове покриття, композиційне покриття, пірофосфатно-цитратний електроліт, корозійна стійкість.

Постановка проблеми. Покриття сплавом Cu-Zn використовують для декоративної обробки поверхні, для поліпшення адгезії сталевих деталей з гумою. Останнім часом використовують також ефект пам'яті β -CuZn [5,6], антимікробні, протибростаючі та протинакипні властивості покриттів [1], для біорозкладних кісткових імплантів [2, 3]. Мідно-цинкові покриття з розвиненою поверхнею використовують для створення електродних матеріалів для батарей, суперконденсаторів і електрокаталізаторів [4].

Стандартні потенціали міді і цинку відрізняються майже на 1 В, що викликає труднощі при їх співосаженні. Необхідність зближення потенціалів відновлення іонів цих металів потребує

використання комплексних електролітів. Декілька століть такі покриття осадили з отруйних ціанідних електролітів. Багато десятиліть здійснюються спроби їх замінити. Крім того, зростають вимоги до функціональних властивостей покриттів, підвищення яких досягається, у тому числі, у випадках використання різних режимів електролізу і введення домішок для створення наноструктурованих і композиційних покриттів. Багатофакторність впливу складу електроліту і режиму електролізу на властивості покриттів потребує всебічних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для електроосадження покриттів сплавом Cu-Zn досліджують тарtratні, трилонатні [5], гліци-

натні, глютаматні [6], нітрилотриацетатні, лактатні [7], гліцератні, триетаноламінові, а також пірофосфатні [8, 9] і цитратні [10] електроліти. Покриття осаджують як звичним гальваностатичним способом, так й з використанням імпульсного струму [11], двохімпульсним методом шляхом чергування двох величин густини струму [12] або потенціалу, використовують трапецеїдальний імпульсний струм.

В останнє десятиліття зріс інтерес до електроосаджених мідьвмісних нанокомпозитних покриттів завдяки їх кращим механічним і корозійним властивостям [13]. Дисперсія наночастинок другої фази у ванні для гальванічного покриття не тільки покращує їх механічні та корозійні властивості, але й підвищує міцність [14].

Метою досліджень було оцінка впливу багатостінних вуглецевих нанотрубок (MWCNT) на процес співосадження міді з цинком в пірофосфатно-цитратному електроліті і формування мультишарових покриттів та порівняння корозійних властивостей мультишарового $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_n$ і композиційного $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_n$ -MWCNT покриттів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методика. Всі розчини готували з реактивів марки «хч» і «чда» на дистильованій воді без додаткової обробки. Базовий електроліт містив, моль/дм³: CuSO_4 – 0,085; ZnSO_4 – 0,165; $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ – 0,5, $\text{K}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ – 0,125; pH 8,5.

Поляризаційні дослідження, осадження зразків та дослідження корозійної стійкості проводили в триелектродній комірниці за допомогою потенціостату MTech SPG-500S: робочий електрод з платини (1 см²) або сталі Ст. 3 (2,25 см²); електрод порівняння – хлоридсрібний (значення потенціалів електродів наведені за цим електродом), допоміжний електрод – платина. Поверхню зразків сталі перед кожним виміром оновлювали за допомогою зачищення карбід-силіконовим папером №№ 500, 1000, 2000, 3000. Швидкість розгортки потенціалів складала 10 мВ/с.

Результати досліджень. Для вибору умов осадження мультишарового покриття на основі сплавів Cu-Zn і прогнозування складу шарів покриття отримували циклічні вольтамперні залежності (ЦВЗ) на платиновому електроді з розгорткою спочатку від стаціонарного у катодному напрямку, потім в анодному. Оскільки при потенціалах анодних гілок, окрім складових електроліту, окислюються різні продукти відновлення, що отримані в діапазоні потенціалів катодних гілок, для більш чіткого визначення закономірностей накопичу-

вали осади сплавів при затримках у ході ЦВЗ на заданих значеннях струму.

Електрохімічні закономірності електродних процесів в вихідному пірофосфатно-цитратному електроліті для осадження сплаву мідь-цинк. На рис. 1а наведено ЦВЗ на платині в пірофосфатно-цитратному електроліті вихідного складу, без введення домішок. Протягом прямого ходу ЦВЗ у катодному напрямку, здійснюються реакції відновлення кисню, що розчинений в електроліті, оскільки електроліт не деаерували, відновлення іонів позитивного металу міді, потім з міддю співосаджується цинк з утворенням сплавів різного складу, все більше збагачених за цинком. При потенціалах анодних гілок спочатку розчиняється цинк з фаз сплаву, що збагачені за цинком, потім, в основному піку, розчиняється мідь або твердий розчин цинку в міді, – α -фаза латуні.

Наявність декількох катодних хвиль на катодній гілці ЦВЗ в широкому діапазоні потенціалів (рис. 1а, кр. 1) при прямому ході свідчить про зміну умов співосадження металів при поляризації електроду. З урахуванням зменшення піків і хвиль при зворотному ході, можливо припустити адсорбційну природу хвиль і значний внесок концентраційних утруднень катодного процесу. При зворотному ході катодних гілок сплавоутворення здійснюється вже в умовах збіднення приелектродного шару за іонами, що розряджаються, й тому – при значеннях густини струму менших, ніж граничні значення струму прямого ходу. В процесі затримки сканування потенціалів протягом 30 с при густині струму 5 мА/см² (кр. 3 рис. 1а) значення потенціалу знижуються (кр. 3 рис. 1б) за рахунок швидкого зменшення кількості адсорбованих сполук. Однак в процесі затримок при 15 мА/см² (кр. 2 рис. 1а) і 40 мА/см² (кр. 3 рис. 1а) значення потенціалів практично не змінюються (кр. 2 і 1 рис. 1б, відповідно), що дозволяє припустити однорідність за товщиною складу осаду, що утворився за цей час.

Розглянемо початок анодних гілок ЦВЗ (рис. 2а). Спостерігаємо, що анодні гілки після межі сканування до 5 мА/см² (кр. 3) і до 15 мА/см² (кр. 2) починаються практично при одному й тому ж значенні потенціалу, при якому починається пік розчинення міді або α -фази сплаву [40]. Анодна гілка ЦВЗ з межею сканування потенціалів 40 мА/см² (кр. 1) починається приблизно на 500 мВ раніше й свідчить про включення в осад вже фази, більш збагаченої за цинком. Потенціали останнього піку на анодній гілці ЦВЗ до межі 40 мА/см² (кр. 1) розташовані при більш негативних потенціалах, ніж піки ЦВЗ до межі 15 мА/см²

(кр. 2) та 5 мА/см^2 (кр. 1), що свідчить про більший вміст цинку в α -фазі цього сплаву.

Електрохімічні закономірності електродних процесів в пірофосфатно-цитратному електроліті у присутності композиційних вуглецевих наночастинок. Після введення вуглецевих нанотрубок у присутності ПАР форма ЦВЗ змінюється незначно, але збільшується величина граничного струму при високій поляризації (рис. 3а). При збільшенні межі сканування потенціалів осад також збагачується цинком (кр. 1 рис. 3б), а потенціал його осадження стабілізується (кр. 3 рис. 3в). Це свідчить про відсутність впливу нанотрубок на механізм співосадження міді з цинком.

Зменшення вмісту ПАР в електроліті у присутності нанотрубок приводить до підвищення граничної густини струму при високій поляризації (кр. 2 і 3 рис. 4а). Це є більш наочним при затримці сканування потенціалів (кр. 2 і 3 рис. 4в), і це практично не впливає при низьких густинах струму (прямий хід катодних гілок ЦВЗ до 15 мА/см^2). Крім того, слід зазначити, що при збільшенні концентрації ПАР збільшується вміст в осаді цинку (анодна гілка кр. 1 починається раніше (рис. 4б), і пік розчинення збагаченої міддю фази зсувається в бік негативних значень (кр. 1 рис. 4а).

Оскільки композиційне покриття доцільно осаджувати в умовах перемішування, розгля-

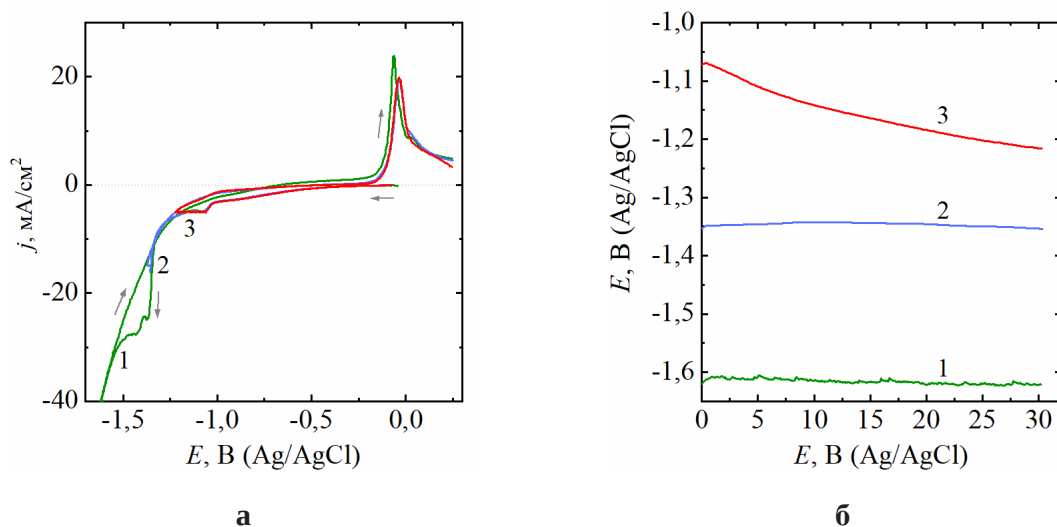


Рис. 1. Циклічні вольтамперні залежності у вихідному пірофосфатно-цитратному електроліті на електроді з Pt з різною межею сканування (а) і хронопотенціограми (б) затримок густини струму протягом 30 с при катодній густині струму на межі розгортки потенціалу, мА/см^2 : 1 – 40; 2 – 15; 3 – 5

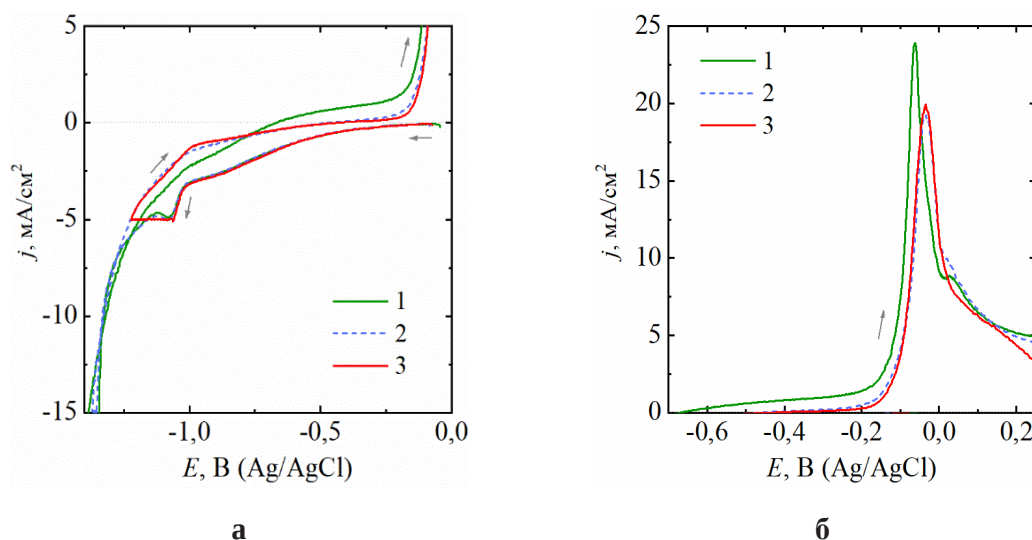


Рис. 2. Фрагменти циклічних вольтамперних залежностей за рисунком 1а у збільшеному масштабі

немо його вплив на електродні процеси. В області потенціалів до інтенсивного виділення водню (до густини струму 40 mA/cm^2), швидкість виділення міді до потенціалу $-0,7 \text{ В}$ в умовах перемішування не змінюється, потім катодний процес прискорюється без зміни набору хвиль (прямий хід катодних гілок ЦВЗ рис. 5). В умовах перемішування площа поверхні катодного осаду збільшується, оскільки, на відміну від кр. 2, катодна гілка зворотного ходу розташовується вище за гілку прямого ходу (кр. 1 рис. 5). Склад осаду практично не змінюється, оскільки анодна гілка починається при такому ж значенні потенціалу, як й без перемішування (рис. 5б). Крім того, збільшується осно-

вний анодний пік та струм пасивації (рис. 5а) при розчиненні сплаву, що сприяє полегшенню і анодного процесу в процесі електролізу.

Формування композиційного мультишарового покриття на основі сплавів мідь-цинк на зразках з вуглецевої сталі. Для осадження мультишарових $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_n$ і композиційних $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_n\text{-MWCNT}$ покриттів з пірофосфатно-цитратного електроліту використовували двохімпульсний гальваностатичний метод. Базові шари покриття, склад яких відповідає складу звичайних латунних покриттів, які містять лише фазу $\alpha\text{-Cu-Zn}$ або частину $\beta\text{-Cu-Zn}$, осаджували при густині струму 12 mA/cm^2 . Додат-

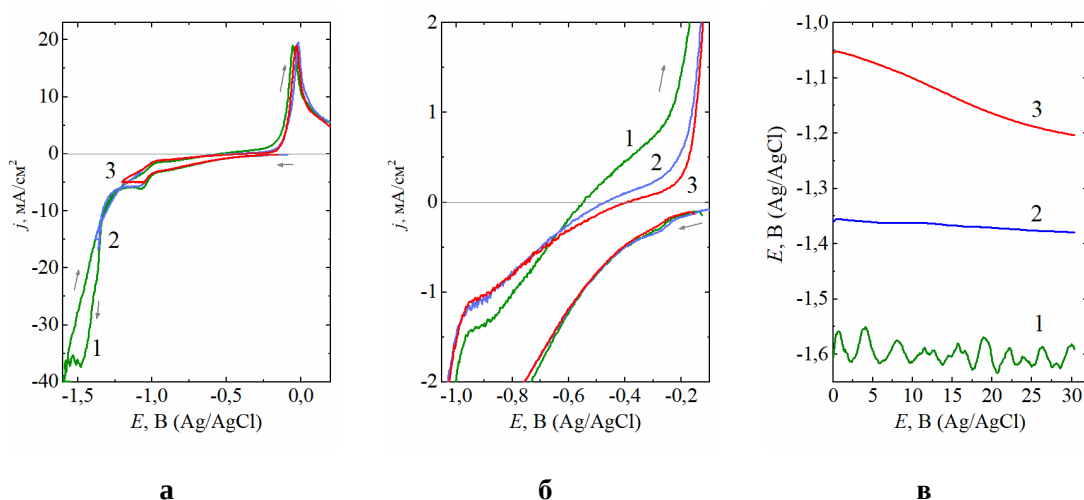


Рис. 3. Циклічні вольтамперні залежності в пірофосфатно-цитратному електроліті з додаванням $3 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ ПАР і $0,5 \text{ г/дм}^3$ МВСНТ на електроді з Pt з різною межею сканування (а), їх фрагменти в збільшеному масштабі (б) та хронопотенціограми протягом затримок густини струму (в). Межа розгортки потенціалу з затримкою розгортки потенціалу протягом 30 с при катодній густині струму, mA/cm^2 : 1 – 40; 2 – 15; 3 – 5

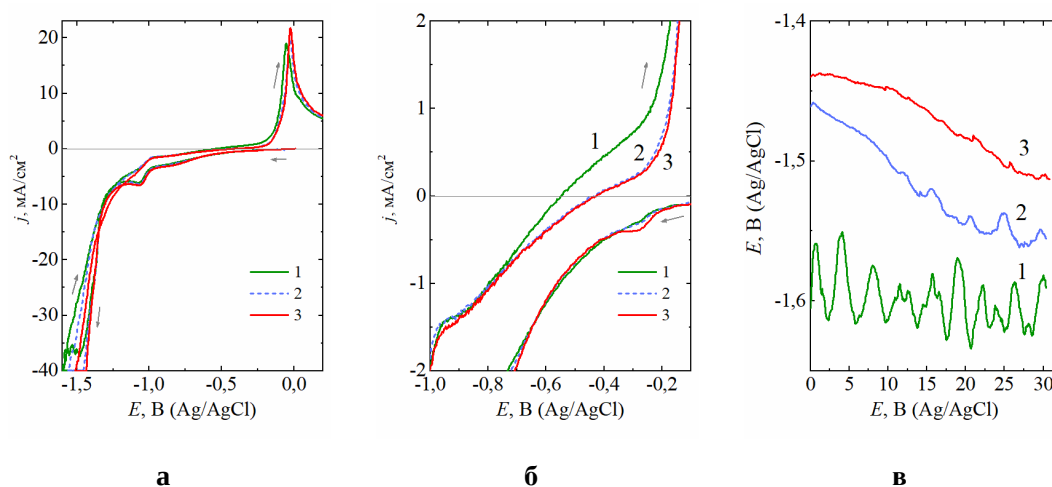


Рис. 4. ЦВЗ на електроді з Pt з межею сканування 40 mA/cm^2 і затримкою протягом 30 с при цій густині струму (а) та їх фрагменти (б) і хронопотенціограми протягом затримок (в) у пірофосфатно-цитратному електроліті, що містить $0,5 \text{ г/дм}^3$ МВСНТ і ПАР, cm^3/dm^3 : 1 – 3; 2 – 1; 3 – 0,5

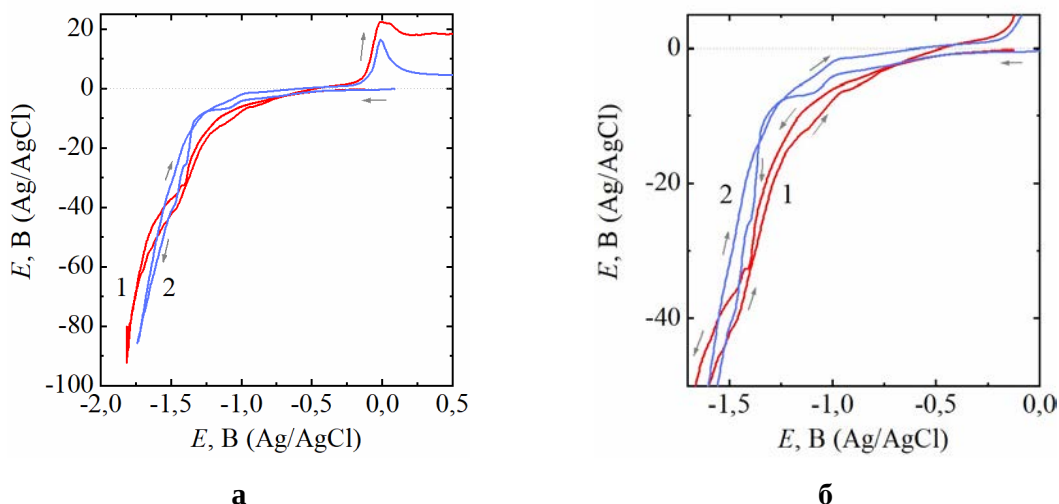


Рис. 5. Циклічні вольтампероматричні залежності на Pt в вихідному пірофосфатно-цитратному електроліті з використанням перемішування (1) і без (2) та їх фрагменти (б)

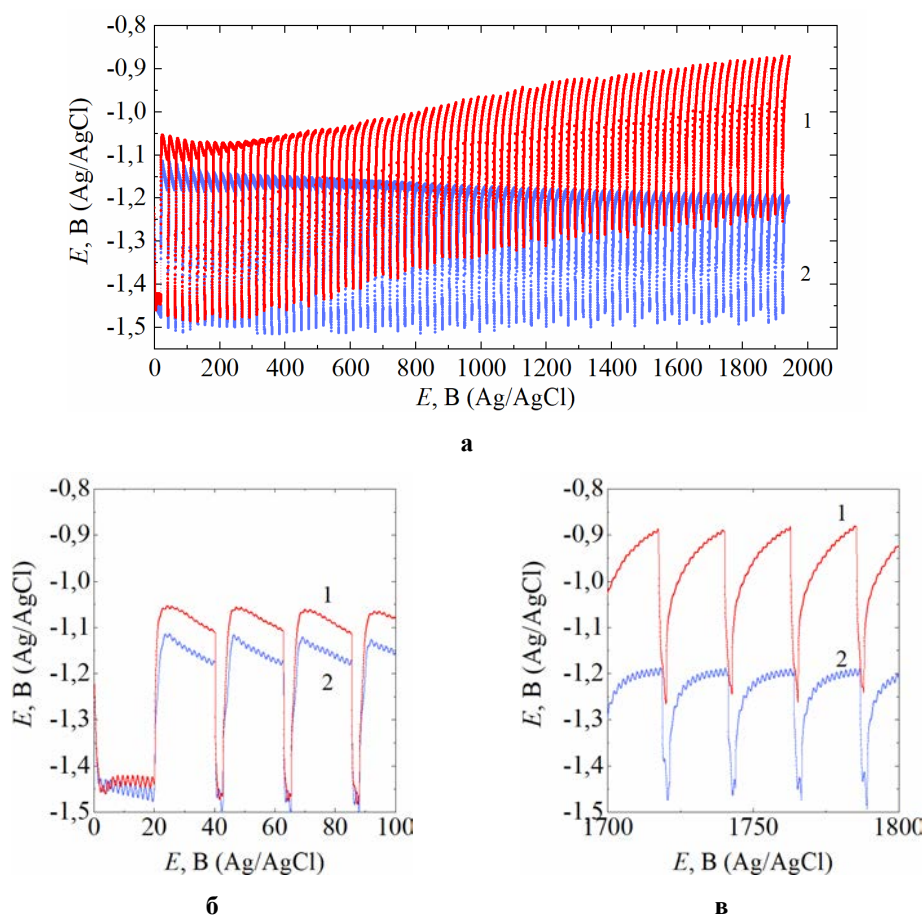


Рис. 6. Хронопотенціограми осадження (а) на вуглецеву сталь $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{доп}}]_{\text{н}}$ (2) і $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{доп}}]_{\text{н}}$ -MWCNT (1) покриттів у режимі $(12 \text{ мА/см}^2\text{-}20\text{с})/(40 \text{ мА/см}^2\text{-}2,5\text{с})$ з пірофосфатно-цитратного електроліту з додаванням $0,5 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ ПАР і $0,5 \text{ г/дм}^3$ MWCNT (1) і без домішок (2), та фрагменти цих хронопотенціограм (б, в)

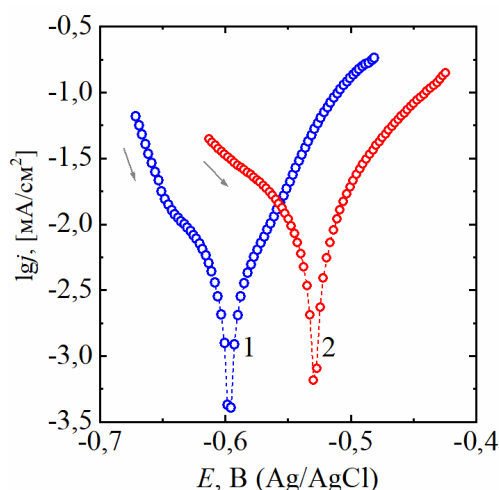


Рис. 7. Корозійні діаграми зразків з покриттями $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_{\text{п}}$ (1) і $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_{\text{п}}\text{-MWCNT}$ (2) в розчині 3,5 % NaCl. Швидкість розгортки потенціалів 1 мВ/с

Таблиця 1

Параметри корозії сталевих зразків з покриттями

Покриття	E, В	R_p , Ом см^2	$i_{\text{кор}}$, мкА/ см^2
$[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_{\text{п}}$	-597	4494	2,43
$[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_{\text{п}}\text{-MWCNT}$	-530	2470	7,90

кові шари, збагачені цинком, осаджували при густині струму 40 мА/см². Хронопотенціограму осадження такого покриття в умовах перемішування наведено на рис. 6 (кр. 2). Композиційне покриття формували введенням вуглецевих нанотрубок в мультишарову матрицю у тіх же умовах осадження (кр. 1). На відміну від ЦВЗ, в умовах тривалого електролізу хронопотенціограми в вихідному електроліті та в електроліті з додаванням ПАР і нанотрубок значно відрізняються (кр. 1 і 2 рис. 6а). Якщо на першому етапі (рис. 6б), характер залежностей не змінюється, лише трохи збільшується значення потенціалів осадження базових шарів сплаву, то при збільшенні часу осадження покриттів (рис. 6в) потенціал осадження базових шарів мультишарового покриття встигає стабілізуватися (кр. 2), але у випадку композиційного покриття (кр. 1) він протягом осадження всього шару збільшується. Така різниця у вигляді хронопотенціограм свідчить про розвинення площі поверхні композиційного покриття в процесі електроосадження (кр. 1 рис. 6а). Наслідком розвинення площі поверхні зі збільшенням значень потенціалу в умовах гальваностатичного осадження є поступова зміна складу осаду композиційного покриття шляхом збагачення більш позитивною міддю.

Дослідження корозійної стійкості покриттів. Розглянемо, як введення в мультишарову матрицю нанотрубок без зміни умов осадження покриття впливає, наприклад, на корозійні властивості покриттів. Корозійні діаграми в розчині хлориду натрію сталевих зразків з мультишаровим і композиційним покриттями наведено на рис. 7. Обидва покриття є катодними по відношенню до сталі. За рахунок збагачення покриття позитивною міддю потенціал корозії E композиційного покриття є на 60 мВ більш позитивним (кр. 2), менш схильним до корозії, але за рахунок збільшення реальної площі поверхні і зменшення поляризаційного опору R_p його швидкість корозії $i_{\text{кор}}$ у 3,3 рази більша, ніж мультишарового покриття (див. табл.). Тобто, формування композиційного покриття потребує інших умов для підвищення його здатності до антикорозійного захисту сталевих поверхні.

Висновки. На підставі аналізу циклічних вольтамперних залежностей з різною межею сканування потенціалів і з затримкою розгортки потенціалів при катодній густині струму цей межі в вихідному пірофосфатно-цитратному електроліті для осадження сплаву Cu-Zn виявлено, що:

1) до густини струму 15 мА/см² катодний осад містить лише фази, збагачені міддю, тобто вільну

міді і α -фази сплаву, а при густині струму 40 mA/cm^2 осад містить збагачені цинком фази при збільшенні вмісту цинку в α -фазі сплаву;

2) введення в пірофосфатно-цитратний електроліт багатостінних вуглецевих нанотрубок (MWCNT) не впливає на механізм співосадження міді з цинком, а при збільшенні концентрації ПАР в електроліті збільшується вміст цинку в катодному осаді;

3) в умовах перемішування катодний процес прискорюється, а після поляризації в область потенціалів інтенсивного виділення водню площа поверхні катодного осаду збільшується.

Порівняння хронопотенціограм формування двоімпульсним гальваностатичним методом в пірофосфатно-цитратному електроліті мультишарового $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_n$ і композиційного $[(\text{Cu-Zn})_{\text{баз}}/(\text{Cu-Zn})_{\text{дод}}]_n$ -MWCNT покриттів, базові шари яких осаджували в умовах перемішування

при густині струму 12 mA/cm^2 і додаткові шари – при густині струму 40 mA/cm^2 , показало, що при тривалому електролізі, на відміну від мультишарового покриття, реальна площа поверхні композиційного покриття збільшується, покриття збагачується міддю. Наслідком цього стала різниця в корозійних властивостях сталевих зразків з покриттями: за рахунок більшого вмісту міді потенціал корозії композиційного покриття є на 60 мВ більш позитивним за потенціал корозії мультишарового покриття, а за рахунок його більшої реальної площі поверхні і меншого поляризаційного опору воно має у 3,3 рази більшу швидкість корозії. Таким чином, введення в мультишарову матрицю нанотрубок потребує, для підвищення антикорозійних властивостей, умов електроосадження, які відрізняються від умов осаження мультишарового покриття.

Список літератури:

1. Li H., Peng Y., Xin L., Li P., Shao Y., Zhang Z., Ren L. Bionic eco-friendly synergic anti-scaling Cu-Zn-CeO₂ coating on steel substrate functionalized by multi-scale structures and heating enhanced adsorption. *Materials & Design*. 2023. Vol. 232. P. 112109.
2. Wu X., Yang Z., Song Q., Sun X., Xu Y., Zhao M., Chen M. Dual plating zinc foam of three-dimensional reconstruction as a high-flux and stable zinc metal anode for aqueous zinc-ion batteries. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 497. P. 154395.
3. Cao J., Wu H., Yue Y., Zhang D., Li B., Luo D., Yang X. Facilely constructing ultrahigh lattice-matched CuZn₅ epitaxial interface for dendrite-free Zn metal anode. *Journal of Energy Chemistry*. 2024. Vol. 99. P. 671–680.
4. Zhang S., Zhao Y., Qian Y., Wang X., Huang J., Ma Y., Zhang B. Stable Li deposition of 3D high-strength-lithiophilicity-porous CuZn current collector with gradient structure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 951. P. 169953.
5. Bharadishettar N., Kumar K., Bhat K. U. Compositionally modulated multilayer Cu-Zn alloy coatings fabricated using eco-friendly non-cyanide pulse electrochemical deposition. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 92. P. 32–37.
6. Ibrahim M. A., Bakdash R. S. Copper-rich Cu-Zn alloy coatings prepared by electrodeposition from glutamate complex electrolyte: morphology, structure, microhardness and electrochemical studies. *Surfaces and Interfaces*. 2020. Vol. 18. P. 100404.
7. Kamel M. M., Alzahrani E., Abbass A. M., Abd Ellah A. A. Brass Alloy Coatings Electrodeposited from an Environmentally Friendly Alkaline Lactate Bath Under Different Operating Conditions. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2022. Vol. 13(1). P. 57.
8. Wang C. Y., Tseng Y. T., Lin J. C., Ciou Y. J., Hwang Y. R. Effect of $[\text{Zn}^{2+}]/[\text{Cu}^{2+}]$ ratio of the bath on the composition and property of Cu-Zn alloy micropillars prepared using microanode-guided electroplating. *Electrochimica Acta*. 2021. Vol. 375. P. 137969.
9. Castillo E., Dimitrov N. Electrodeposition of Zn-rich Cu_xZn(1-x) films with controlled composition and morphology. *Journal of The Electrochemical Society*. 2021. Vol. 168(6). P. 062513.
10. Döşlü S. T., Döner A., Yıldız R. Electrocatalysis property of CuZn electrode with Pt and Ru decoration. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46(43). P. 22409–22421.
11. Wang Z., Yliniemi K., Wilson B. P., Lundstrom M. Green and controllable preparation of Cu/Zn alloys using combined electrodeposition and redox replacement. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2022. Vol. 10(14). P. 4770–4779.
12. Maizelis A. Corrosion Properties of Nanostructured Multilayer $[(\text{Cu-Zn})_1/(\text{Cu-Zn})_2]_n$ Coatings. 2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). IEEE. 2022.
13. Huang G., Wang H., Cheng P., Wang H., Sun B., Sun S., Ding G. Preparation and characterization of the graphene-Cu composite film by electrodeposition process. *Microelectronic engineering*. 2016. Vol. 157. P. 7–12.
14. Long X., Bai Y., Algarni M., Choi Y., Chen Q. Study on the strengthening mechanisms of Cu/CNT nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 645. P. 347–356.

Stepanova D.S., Maizelis A.O. ELECTROCHEMICAL FORMATION OF [(Cu-Zn)_{баз}]/[(Cu-Zn)_{доп}]_n-MWCNT COMPOSE MULTILAYER COATING

The manuscript is devoted to the analysis of the influence of multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) on the electrodeposition process and corrosion properties of coatings based on copper-zinc alloys. The methods of cyclic voltammetry with a potential scan delay, a two-pulse galvanostatic method of multilayer coatings formation and a polarization method of studying corrosion properties were used. Based on the analysis of cyclic voltammetry with different potential scan limits, it was found that the coatings obtained at low current densities in the base pyrophosphate-citrate electrolyte for the deposition of the Cu-Zn alloy contain free copper and the α -phase of the alloy, a solid solution of zinc in copper. With an increase in the deposition current density, the zinc content in the α -phase of the alloy increases and zinc-enriched phases appear. It is shown that the introduction of carbon nanotubes into the pyrophosphate-citrate electrolyte together with a stabilizing surfactant does not affect the mechanism of copper and zinc codeposition, but an increase in the surfactant concentration reduces the rate of the cathodic process with an increase in the zinc content in the coating. It was found that under stirring conditions the cathodic process is accelerated, and the cathodic deposit has a developed structure in the potential region over limit.

The chronopotentiograms of the formation under the same conditions of the multilayer [(Cu-Zn)_{баз}]/[(Cu-Zn)_{доп}]_n and composite [(Cu-Zn)_{баз}]/[(Cu-Zn)_{доп}]_n-MWCNT coatings were compared: the base layers were deposited under stirring conditions at a current density of 12 mA/cm², the additional layers at a current density of 40 mA/cm². It was found that with prolonged electrolysis the surface area of the composite coating gradually increases, the coating is enriched with copper. Due to the higher positive copper content, the corrosion potential of the composite coating is 60 mV higher than that of the multilayer coating. However, due to its larger effective surface area and lower polarization resistance, it has a higher corrosion rate.

Key words: copper-zinc alloy, multi-walled carbon nanotubes, multilayer coating, composite coating, pyrophosphate-citrate electrolyte, corrosion resistance.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 17.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Столяренко Г.С.

Черкаський державний технологічний університет

Коваль М.Г.

Черкаський державний технологічний університет

Фоміна Н.М.

Черкаський державний технологічний університет

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОХЕМОДЕСТРУКЦІЇ СПОЛУК, ЩО ВАЖКО РОЗКЛАДАЮТЬСЯ

Дослідження, проведені науковцями інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського НАН України підтвердили, що питна вода з централізованого водопостачання містить великі обсяги фармацевтичних препаратів, зокрема антибіотики, гормони, заспокоювальні і антисудомні препарати та знеболюючі, а також інші токсичні сполуки, а саме пестициди та тригалометани. Концентрація цих препаратів у питній воді мізерно мала, але можливі наслідки довготривалого використання, хоча і в незначних кількостях, у вигляді дози ліків.

Експерти визначили, що додавання у питну воду хлору, що є стандартною процедурою для знезаражування води, підсилює дію токсичних речовин, спричиняючи збільшення онкологічних захворювань.

Отже, імунітет мешканців м. Черкаси і області значно знижений у порівнянні з іншими областями України внаслідок багаторічного вживання питної води, джерелом якої є р. Дніпро. Водопідготовка питної води, що проходить на Дніпровський водоочисний станції неспроможна видалити з води забруднювачі до норм, які були б небезпечними для здоров'я людини. Гранично допустимі концентрації яких складають десятки мкг на дм^3 .

У статті наведені результати розробки за стадіями технології очищення виробничих стічних вод від сполук, що важко розкладаються – пестицидів. Пропонується попередня обробка початкової води озono-повітряною сумішшю для насичення розчинів, що містять пестициди. Відпрацьована озono-повітряна суміш використовується на стадії плазmo-хімічного розкладання органічних сполук як агент з охолодження зони розряду. Застосування, як каталізатора сталевих стружок, приводить до утворення ферум (III) гідроксиду, який на стадії співосадження адсорбує залишкову кількість пестицидів.

Описано багатоцільову електроактиваційну технологію, що забезпечила глибоке очищення і отримання високого ступеня деструкції пестицидів та досягнення значення концентрації пестицидів менше ГДК у воді після очищення.

Ключові слова: питна вода, пестициди, електрокоагуляція, токсичність, забруднені речовини, електроактивація, окиснення, метод озонування, плазmo-хімічне розкладання органічних речовин.

Постановка проблеми. Методи очищення стічної води не завжди забезпечують видалення забруднень відповідно до вимог санітарних норм і характеризуються малою ефективністю, що призводить до неможливості вирішення проблем з якісною водопідготовкою питної води.

Прогресивним напрямом в технології очищення природних вод є використання електрохімічних методів, зокрема методу очищення води в електролізерах з розчинними електродами – електрокоагуляцією або електроактивацією. Ці методи забезпечують високий рівень видалення з води забруднень

у вигляді суспензій мінерального, органічного та біологічного походження з одночасним процесом хемотреструкції пестицидів та інших сполук, що важко окиснюються.

Суттєвою перевагою електрохімічних методів перед реагентними методами очищення є відмовлення від будівництва великих очисних споруд, що займають значні виробничі площі і вимагають великих капітальних витрат.

Електрокоагуляція дозволяє здійснити процес очищення води в компактних установках, автоматично діючих та легко обслуговуються.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Порівняльне дослідження ультразвукової кавітації та реактиву Фентона для деградації бісфенолу А в деіонізованих та природних водах показало значні переваги останнього [1].

Фотохімічна обробка водних розчинів – хлорфенолу у порівнянні з використанням ультрафіолетового (УФ) опромінення, перекису водню та реактиву Фентона дає суттєві економічні переваги [2].

При дослідженні кінетики розкладання фенолу під впливом УФ– опромінення з H_2O_2 та без нього було порівняно швидкісні характеристики на фотокаталізаторах TiO_2 , Fe-TiO_2 та Fe-C-TiO_2 і відзначено вплив присутності заліза для наступних стадій очищення [3].

Каталітична дія системи $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ в електрофентонівській деградації антимікробного хлорофену приводить до високих показників ступеня очищення [4]. Методологія експериментального проектування застосована для електрофентонівської обробки для деградації гербіциду хлортолуру показала його високу ефективність [5].

Дослідження окиснення електрохімічними вдосконаленими окисними процесами (ЕАОР) показало високу інтенсивність щодо очищення від пестицидів [6].

Застосування електрохімічного очищення промислових стічних вод показало технологічну доцільність та економічну вигоду електрокоагуляційного процесу [7].

Використання сонячної енергії для фотоелектро-фентонівської деградації крезолів мінімізує витрати на синтез оксигеновмісних радикалів у рідкій фазі [8].

Дослідники у роботі [9] пропонують для електрокоагулятора – основного апарату – обирати конструкцію циліндричного проточного реактора.

Нові високоефективні методи очищення від розчинних та нерозчинних поллютантів знаходять відображення в роботах українських науковців [10].

Багато авторів, приділяючи увагу ролі кисню при отриманні оксигеновмісних радикалів за Фентоном, пропонують ідею використання більш ефективного окисника – озону – для інтенсифікації процесу розкладання сполук, що важко окиснюються [11].

Запропонувати процес високоефективного методу для очищення води від пестицидів та інших сполук, що важко окиснюються. В даній роботі поставлено завдання: розрахувати та спроектувати апарат для технологічної схеми очищення стічних вод, що містять пестициди. Як основний процес обрано метод електрокоагуляції – найбільш ефективного та прогресивного методу очищення такого

виду води на даний момент, який суміщено з системою плазмо-хімічного розкладання органічних речовин й інтенсифікації процесу очищення попереднім озонуванням для чого використана установка синтезу озону і застосовано озono-повітряні суміші.

Для перевірки технології, що пропонується, було отримано від виробництва п'ять видів розчинів сумішей пестицидів, які позначені в роботі за їх комерційними назвами: пестицид «Голіаф»; пестицид «Ультрасил Дуо»; пестицид «Мілідар»; пестицид «Панда» та пестицид «КвінСтар Макс», а також розчини загального стоку виробництва.

Пошук оптимальної технології обробки модельного розчину проводився на п'яти пробах пестицидів, які передавались з виробництва у вигляді зразків фракцій рідкої фази за наважками для отримання робочих розчинів з концентрацією пестицидів 1,0 – 1,1% об'ємом кожного робочого розчину – 8,2 дм³. ГДК кожного з компонентів в розчинах пестицидів складало 50-100мкг/дм³.

Мета. Провести дослідження деструкції пестицидів – знешкодження органічних речовин на експериментальній установці з системою плазмо-хімічного розкладання органічних речовин з одночасним впливом окисника – озону для використання радикально-каталітичних процесів. Дослідження необхідні для розробки та створення промислової стаціонарної стендової установки – технологічного блоку в системі очищення стічних вод, що містять пестициди.

Виклад основного матеріалу. Запропоновано, розроблено та змонтовано установку, що складається з декількох блоків.

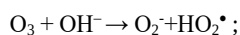
Блок 1 – озонування потоку повітря для насичення озоном початкової води.

Блок 2 – електрокоагуляція суміщена з електрохімічною обробкою стічної води на каталізаторі в зоні розряду високої напруги – система плазмо-хімічної деструкції пестицидів.

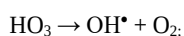
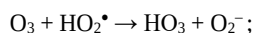
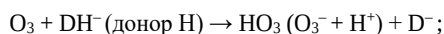
Блок 3 – розділення залізного шламу, що утворюється, та очищеної води шляхом відстоювання. Після відведення очищеної води шлам ферум (III) гідроксиду промивається водою, а промивні води змішуються з початковою водою для направлення на стадію озонування. Промитий залізовмісний шлам повертається на стадію плазмо-хімічної деструкції пестицидів в блок 2.

Завдяки багатоцільовому призначенню технології установка не тільки забезпечує високі значення зниження вмісту пестицидів на виході менше ГДК, але й очищує від супутніх органічних та неорганічних домішок шляхом співосадження на ферум (III) гідроксиді.

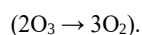
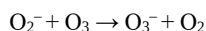
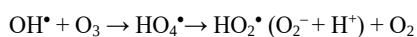
1. Блок попереднього озонування: блок синтезу озоно-повітряної суміші и обробки початкової води. Окиснювальні властивості озону пов'язані з його прямою взаємодією з багатьма органічними та неорганічними речовинами, так і з розпадом у воді на вільні радикали з утворенням $\text{OH}\cdot$, $\text{HO}_2\cdot$ – радикалів, найбільш реакційно спроможних з відомих окиснювачів у водному середовищі. Процес розпаду озону у воді проходить спонтанно за ланцюговим механізмом:



ініціювання



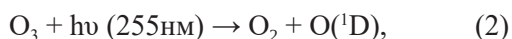
продовження



(1)

Обрив радикальних ланцюгів може відбуватися в результаті диспропорціонування радикалів $\text{O}_2\cdot$, $\text{HO}_2\cdot$ з утворенням пероксиду водню, або за рахунок взаємодії $\text{OH}\cdot$ $\text{OH}\cdot$ з «пастками» радикалів – речовинами, що утворюють вторинні радикали, які не беруть участі у продовженні ланцюга.

У воді біля 50% озону розкладається на вільні радикали. За наявності у воді донорів атомів Гідрогену, або іонів OH^- , процес розпаду озону прискорюється. Часто з метою інтенсифікації цього процесу застосовується пероксид водню або дія УФ-опромінення:



Властивість озону розпадатися на вільні радикали використовується в процесах взаємного окиснення, коли при сумісній дії O_3 , УФ, H_2O_2 – деструкція забруднюючих речовин відбувається за рахунок радикалів $\text{OH}\cdot$.

Лабораторна установка для озонування води. З можливих методів отримання озону використовують бар'єрний розряд, електроліз, фотохімічний спосіб та високочастотне електричне поле. Створена і апробована в лабораторних умовах установка використовує для синтезу озону генератор озону бар'єрного типу.

Озон отримували в блоці генератора озону з системою осушення газового потоку, що може

працювати на повітрі, повітряно – кисневій суміші та на чистому кисні. Генератор озону стандартного типу складається з двох електропровідних частин і електродів, розташованих на невеликій відстані між ними. Конструктивно електроди виконані у вигляді двох співвісно розташованих циліндрів з проміжним шаром ізоляції. На електроди подавали змінний електричний струм високої напруги (10кВ) і між електродами утворювався озон. На лабораторній озонаторній установці вивчали умови застосування озону під час очищення проміжних і продукційних розчинів від органічних домішок. У блоці озонування відбувалося насичення озоном початкового робочого розчину.

Схема експериментальної установки для озонування для синтезу озону та обробки початкової води представлена на рис. 1.

На практиці, через джерело тихого розряду пропускають атмосферне повітря, яке попередньо пройшло глибоке очищення і осушення до вологовмісту не більше 0,05 г/см³. Можливість виробництва озону на місці із оточуючого середовища – це значна перевага перед іншими технологіями.

Система осушення, яку використали під час проведення досліджень, включала в собі чотири послідовно поєднаних поглиначі з 96% сульфатною кислотою, силікагелем, поглиначем марки NaX і P₂O₅, що дали змогу очищувати повітряний потік від пари води. Осушену газову суміш направляли в озонатор.

Для визначення оптимальної роботи лабораторної установки дослідили залежність продуктивності установки від напруги, результати наведені в табл. 1.

Для визначення озону в газовій фазі застосували йодометричний метод. Вимірювання і контроль концентрації озону здійснювали на виході із генератора озону та на виході з барботажною колонки.

Для визначення дози озону (Do_3) побудували графічну залежність концентрації озону на вході та виході з озонатора ($\text{Co}_3=f(\tau)$) від часу оброблення розчину. Доза озону, необхідна для повного очищення проби розчину, визначається як різниця між кількістю озону, що була подана за час оброблення розчину та кількістю не поглиненого озону. Графічним інтегруванням залежності $\text{Do}_3=f(\tau_0, \tau_1)$, визначено площу, яка відповідає питомим витратам

Таблиця 1

Залежність продуктивності установки від напруги

Напруга, кВ	7	8	9	10	11	12
Продуктивність O_3 , $\cdot 10^{-2}$, г/хв	0	0,58	2,5	4,8	7,7	7,4

там озону. Після масштабування значень площі було визначено реальні питомі витрати окисника. Розрахована Do_3 становить $4,44 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$.

На рис. 2 та 3 наведено залежність зміни концентрації пестицидів від часу контактування фаз в системі Газ – Рідина при зміні висоти шару рідини в барбатажному апараті та швидкості подання озono-повітряної суміші.

Для рис. 2 висота шару початкового розчину складала 100 мм, а для рис. 3 – 500 мм. Швидкість подавання озono-повітряної суміші: 1 – 800; 2 – 600; 3 – 200 $\text{см}^3/\text{хв}$.

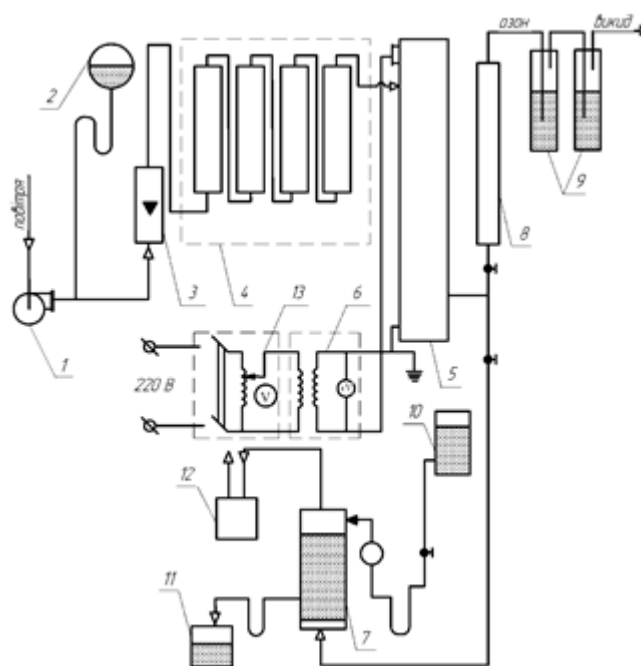


Рис. 1. Схема експериментальної установки для синтезу озону та обробки початкової води:
1 – компресор; 2 – моностат; 3 – ротаметр;
4 – блок осушення повітря; 5 – генератор озону;
6 – підвищуючий трансформатор; 7 – барботажна колонка; 8 – спектрофотометр; 9 – склянка Дрекслера з розчином KI; 10 – ємкість із розчином для очищення; 11 – ємкість із очищеним розчином; 12 – крапельовловлювач; 13 – лінійний автотрансформатор

За результатами досліджень максимальний ступень деструкції пестицидів прямим озонуванням початкової води не дає ступінь очищення від пестицидів більше ніж 80% (рис. 2 та 3).

2. Блок електрокоагуляції. Система хемодеструкції сполук, що важко розкладаються. Синтез радикалів під дією УФ-обробки, або перекису водню відбувалися у другому блоці – блоці електрокоагуляції. Інтенсифікація процесу хемодеструкції пестицидів заснована на синтезі та використанні вискоєфективних радикалів $\text{OH}\cdot$ і $\text{NO}_2\cdot$, при синтезі яких відбу-

вається первинне ініціювання процесів розкладання сполук та утворення оксигеновмісних вуглеводневих радикалів в розчинах. Вуглеводневі радикали спонтанно або під впливом додаткових плазмо-хімічних процесів розкладаються на вуглеводневі фрагменти, а також вуглекислий газ та воду. При цьому досягається мінімізація енергетичних витрат на загальний результат процесу хемодеструкції пестицидів.

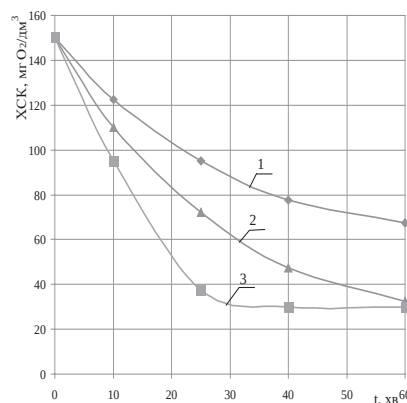


Рис. 2. Залежність зміни концентрації пестицидів від часу: $h=50 \text{ мм}$; $\omega_1 = 200 \text{ см}^3/\text{хв}$; $\omega_2 = 600 \text{ см}^3/\text{хв}$; $\omega_3 = 800 \text{ см}^3/\text{хв}$

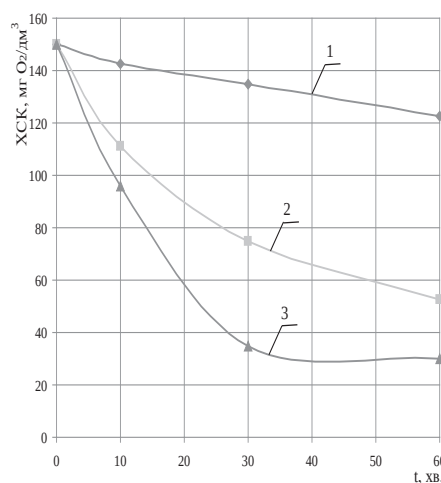


Рис. 3. Залежність зміни концентрації пестицидів від часу: $h=100 \text{ мм}$; $\omega_1 = 200 \text{ см}^3/\text{хв}$; $\omega_2 = 600 \text{ см}^3/\text{хв}$; $\omega_3 = 800 \text{ см}^3/\text{хв}$

Систему інтенсифікації процесу хемодеструкції пестицидів представлено на лабораторній установці – електрокоагулятор із зоною імпульсного високого розряду (рис. 4).

Лабораторна установка являє собою комплекс обладнання (рис. 4), який складається з джерела живлення, системи контролю за параметрами, каталітичного реактора, високовольтної зони синтезу радикалів $\text{OH}\cdot$ і $\text{NO}_2\cdot$, та системи дозування газового потоку для ретельного перемішування фаз, електричної схеми живлення. Електрокаталітичний

Таблиця 2

**Протокол результатів досліджень щодо очищення розчину пестицидів
2,4-Д кислота + Дикамба у формі диметиламіної солі (комерційна назва «Голіаф»)**

Ресстраційний номер зразка	Назва зразка	Назва показника	Позначення НД на метод випробування	Вимоги НД на продукт, мг/ дм ³	Результат випробувань, мкг/ дм ³	Вміст компонентів у розчині за стадіями
0434-18R	Голіаф	2,4-Д кислота	EN 15662:2008, PI 7.7-01, PI 7.7-02	Не більше 0,002	146	В очищеній воді після стадії 2
		Дикамба у формі диметиламіної солі, мг/ дм ³		Не більше 0,02	8	
0435-18R	Голіаф	2,4-Д кислота	EN 15662:2008 PI 7.7-01, PI 7.7-02	Не більше 0,002	143	В очищеній воді після стадії 2
		Дикамба у формі диметиламіної солі		Не більше 0,02	7	
0436-18R	Голіаф	2,4-Д кислота	EN 15662:2008 PI 7.7-01, PI 7.7-02	Не більше 0,002	143	В очищеній воді після стадії 2
		Дикамба у формі диметиламіної солі		Не більше 0,02	7	
0437-18R	Голіаф	2,4-Д кислота	EN 15662:2008 PI 7.7-01, PI 7.7-02	Не більше 0,002	1100	У початковій воді перед стадією змішування з промивними водами
		Дикамба у формі диметиламіної солі		Не більше 0,02	700	

Таблиця 3

Характеристики хромато-мас-спектрометрії

Найменування і тип хроматографів	Види детекторів
Рідинний хроматограф Agilent 1260	з одноквадрупольним детектором Agilent 6125
Рідинний Agilent 1290	з трьохквадрупольним детектором Agilent 6460
Газовий хроматограф Agilent 7890B	з одноквадрупольним детектором Agilent 5977B
Газовий хроматограф Agilent	7890B з трьохквадрупольним детектором Agilent 7000D

реактор 1 – зона розряду в якому відбувається синтез оксигеновмісних радикалів, хемодеструкція пестицидів та вуглеводневих радикалів при використанні сумісної дії озону, розряду та каталізатора. В об'ємі рідкої фази спостерігається ефективно розкладання пестицидів. Контроль температурного режиму в зоні розряду здійснювався дозуванням газового потоку, який направлявся після процесу озонування початкової води. Таким чином, здійснювалось повітряне охолодження в зоні розряду.

Електрокаталітичний реактор (один або декілька залежно від витрат води, конструктивних особливостей системи виду та кількості пестицидів) монтується на кварцевій трубці з використанням сітчастих електродів з легованої сталі та системи подавання напруги (U=10кВ) в зону контакту фаз.

Обробка проб кожного розчину пестицидів проводилась за багатостадійною технологічною схемою.

Стадія 1 – насичення озоном початкових розчинів в блоці 1.

Стадія 2 – обробка розчинів пестицидів на установці імпульсного розряду високої напруги (U=10кВ) у присутності залізного каталізатора в потоці викидних газів з установки озонування.

Стадія 3 – розділення ферум (III) гідроксиду та очищеної води методами відстоювання або фільтрації крізь скляний фільтр з отриманням очищеної води (блок 3).

Стадія 4 – промивка твердої фракції (ферум (III) гідроксиду) водою, змішування промивної води з початковою водою на стадії 1 і повертання ферум (III) гідроксиду на стадію 2.

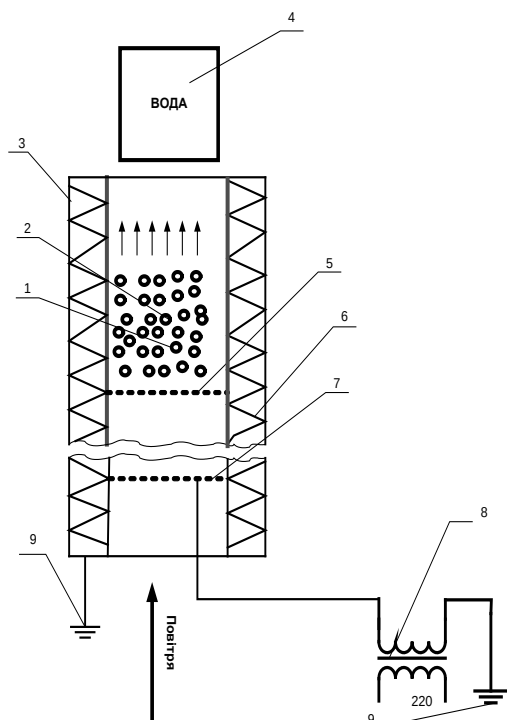


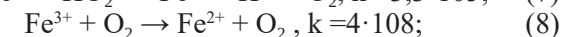
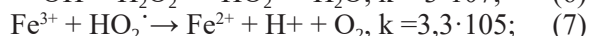
Рис. 4. Електрокоагулятор із зоною імпульсного високого розряду:
 1 – електрокаталітичний реактор;
 2 – каталізатор – залізна стружка;
 3, 6 – керамічні трубки; 4 – ємкість із початковою водою, змішаною з промивними водами стадії 4; 5, 7 – подова сітка високовольтного електроду;
 8 – джерело живлення

Остаточне очищення від пестицидів та інших токсичних домішок пов'язана з озono-радикальними реакціями; застосуванням залізного каталізатора в зоні розряду відбувається за реакціями (4) – (9).

За результатами досліджень встановлено, що початкове значення рН є одним з визначальних параметрів при оптимізації процесів в системі Фентона.

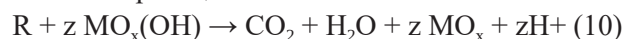
На ступінь деструкції пестицидів впливає співвідношення реагентів, концентрація H_2O_2 та концентрація каталізатора.

Наведемо хімізм процесу окиснення за Фентоном:



Метод електро-Фентона, що використовує електрогенерований реагент Фентона, де $O_2 + O_3$ барботується крізь розчин і відновлюється до пероксиду водню (H_2O_2) на катодній поверхні.

У випадку присутності R (забруднювача – молекули пестициду) в розчині, синтезовані інтермедіати приводять до його повного окиснення за загальною реакцією:



Роль озону пов'язана з попереднім руйнуванням зв'язків в реагенті R, а також зі збільшенням концентрації радикалів $OH^\cdot$ і $HO_2^\cdot$ в зоні розряду, що приводить до високих показників процесу деструкції пестицидів (табл.4).

Як приклад, в таблиці 2 наведено протокол результатів досліджень щодо очищення розчину пестицидів 2,4-Д кислота + Дикамба у формі діетиламінної солі (комерційна назва «Голіаф»).

Порівняння вмісту пестицидів у початкових та кінцевих пробах визначалась за сучасними методами в лабораторії хромато-мас-спектрометрії (табл. 3).

Результати випробувань процесів впливу озону, зони високовольтного розряду та каталізатору на ступінь розкладання пестицидів у рідкій фазі в системі Газ – Рідина – Тверда фаза (залізний каталізатор) представлені в табл. 2 для пестицидів зразка «Голіаф».

Порівняння результатів аналізів за змістом пестицидів в початковій воді та у воді після стадії 2 показали, що ступінь деструкції складала 86,7 – 93,7%.

Після адсорбції залишкових пестицидів на ферум (III) гідроксиду на стадії 3 сумарний ступінь очищення складав 95-96%. Для стічних вод підприємства сумарний ступінь очищення досягав 98-99,7%.

Кінцеві результати очищення різних розчинів з пестицидами: «Голіаф», «Ультрасил Дуо», «Мілідар», «Панда», та «КвінСтар Макс» наведено в табл. 4.

Висновки.

1. При обробці розчинів пестицидів в електрокоагуляторі в зоні імпульсного бар'єрного розряду високої напруги в присутності залізного каталізатора і розчиненого озону отримано ступені деструкції сполук, що важко розкладаються до 93,7–99,8%.

2. Отримані значення ступеня деструкції означають, що глибоке очищення розчинів води, що містять пестициди, дають можливість досягнути концентрацій менші значень гранично допустимих концентрацій (ГДК) 150-200 мкг/дм³.

3. Для стічних вод підприємства сумарний ступінь очищення досяг 98-99,7%.

Таблиця 4

Результат очищення різних розчинів з пестицидами

Види пестицидів	«Голіаф»	«Ультрасил Дуо»	«Міладар»	«Панда»	«КвінСтар Макс»
Ступінь розкладання органічних сполук, %	93,7	95,4	99,5	96,8	99,8

Список літератури:

1. Torres R.A., Abdelmalek F., Combet E., Pétrier C., Pulgarin C. A comparative study of ultrasonic cavitation and Fenton's reagent for bisphenol A degradation in deionised and natural waters. *Journal of Hazardous Materials. Environmental Applications of Advanced Oxidation Processes*. 2007. Vol. 146, № 3. P. 546–551. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.056.
2. Pouloupoulos S.G., Nikolaki M., Karampetsos D., Philippopoulos C.J. Photochemical treatment of 2-chlorophenol aqueous solutions using ultraviolet radiation, hydrogen peroxide and photo-Fenton reaction. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, № 1-2. P. 582–587. DOI: 10.1016 / j.jhazmat. 2007. 09. 002.
3. Losito I., Amorisco A., Palmisano F. Electro-Fenton and photocatalytic oxidation of phenyl-urea herbicides: An insight by liquid chromatography–electrospray ionization tandem mass spectrometry. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008. Vol. 79, № 3. P. 224–236. DOI: 10.1016 /j.apcatb. 2007.10. 029.
4. Sirés I., Garrido J. A., Rodríguez R. M., Brillas E., Oturan N., Oturan M. A. Catalytic behavior of the $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ system in the electro-Fenton degradation of the antimicrobial chlorophene. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2007. Vol. 72, № 3-4. P. 382–394. DOI: 10.1016/j.apcatb.2006.11.016.
5. Abdessalem A. K., Oturan N., Bellakhal N., Dachraoui M., Oturan M. A. Experimental design methodology applied to electro-Fenton treatment for degradation of herbicide chlortoluron. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008. Vol. 78, № 3-4. P. 334–341. DOI: 10.1016/j.apcatb.2007.09.032.
6. Oturan M.A., Brillas E. Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOPs) for the Environmental Applications. *Portugaliae Electrochimica Acta*. 2007. Vol. 25, P. 1–18. DOI: 10.4152/pea.200701001.
7. Rajkumar D., Palanivelu K. Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 2004. Vol. 113, № 1. P. 123–129. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.05.039.
8. Flox C., Cabot P.L., Centellas F., Garrido J. A., Rodríguez R. M., Arias C., Brillas E. Solar photoelectro-Fenton degradation of cresols using a flow reactor with a boron-doped diamond anode. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2007. Vol. 75, № 1-2. P. 17–28. DOI: 10.1016/j.apcatb.2007.03.010.
9. Raghu S., Basha C.A. Electrochemical treatment of Procion Black 5B using cylindrical flow reactor – A pilot plant study. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 139, № 2. P. 381–390. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.082.
10. Трус І.М., Галиш В.В., Скиба М.І., Радовенчик Я.В., Гомеля М.Д. Нові високоефективні методи очищення від розчинних та нерозчинних поллютантів: монографія. Київ : Кондор, 2020. 272 с.
11. Деструктивні методи очищення води. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 101 «Екологія», 161 «Хімічні технології та інженерія». КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 64 с.

Stoliarenko H.S., Koval M.G., Fomina N.M. DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGICAL SCHEME FOR THE ELECTROCHEMICAL DESTRUCTION OF HARD-TO-DECOMPOSE COMPOUNDS

Research conducted by scientists at the A.V. Duman Institute of Colloid Chemistry and Water Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine has confirmed that drinking water from the centralized water supply contains large amounts of pharmaceuticals, including antibiotics, hormones, sedatives, and antidepressants. Dumansky Institute of Colloid Chemistry and Water Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine have confirmed that drinking water from centralized water supplies contains large amounts of pharmaceuticals, including antibiotics, hormones, sedatives, anticonvulsants, and painkillers, as well as other toxic compounds, namely pesticides and trihalomethanes. The concentration of these drugs in drinking water is negligible, but there are possible consequences of long-term use, albeit in small amounts, in the form of a dose of medicine.

Therefore, the immunity of residents of Cherkasy and the surrounding region is significantly reduced compared to other regions of Ukraine due to many years of drinking water sourced from the Dnieper River. Water treatment at the Dnieper water purification plant is unable to remove contaminants from the water to levels that would be safe for human health. The maximum permissible concentrations are tens of micrograms per cubic metre.

The article presents the results of the development of a technology for the purification of industrial wastewater from persistent compounds – pesticides. It proposes the preliminary treatment of raw water with an ozone-air mixture to saturate solutions containing pesticides. The spent ozone-air mixture is used at the stage of plasma-chemical decomposition of organic compounds as an agent for cooling the discharge zone. The use of steel chips as a catalyst leads to the formation of ferric hydroxide, which adsorbs the residual amount of pesticides at the co-precipitation stage.

A multi-purpose electroactivation technology is described, which ensured deep purification and a high degree of pesticide destruction, and achieved a pesticide concentration below the MPC in water after purification.

Key words: drinking water; pesticides; electrocoagulation, toxicity, pollutants, electroactivation, oxidation, ozonation method, plasma-chemical decomposition of organic substances.

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 15.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Столяренко Г.С.

Черкаський державний технологічний університет

Коваль М.Г.

Черкаський державний технологічний університет

Фоміна Н.М.

Черкаський державний технологічний університет

ЕЛЕКТРОАКТИВАЦІЯ ЯК МЕТОД РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД НА СТАДІЇ ВОДОПІДГОТОВКИ

Одним із найбільш цінних скарбів, якими забезпечила нас природа, є вода. Вода, яка використовується в господарстві і промисловості, дуже забруднена. В ній накопичуються речовини органічного і мінерального походження, видалення яких з кожним днем стає все складніше і дорожче. Тому будь-які дослідження, спрямовані на скорочення токсичних і хімічно-шкідливих інгредієнтів в промислових стоках і в природній воді, створення ресурсозберігальних технологій очищення води, є надзвичайно актуальними і виправдовують свої затрати.

Стаття присвячена електрохімічному методу обробки води, який займає важливе місце серед інших методів очищення природних і стічних вод, що дозволяє відмовитися від використання хімічних реагентів.

У статті висвітлюється проблема забруднення води р. Рось на Черкащині, якість води якої підтверджено дослідженнями щодо перевищення вмісту нафтопродуктів, органічних сполук, пестицидів та важких металів, що є результатом скидання в річку недостатньо очищених стічних вод. У статті авторами висвітлено створення ресурсозберігальної технології інтенсифікації процесів очищення природних вод за допомогою електроактивації шляхом отримання католіту та аноліту.

У статті розглянуто очищення річкової води від органічних домішок та іонів важких металів методом електроактивації при мінімальному значенні сили струму на залізних катодах, залізних та титанових анодах; визначено максимальний ступінь очищення та обґрунтовано оптимальні умови ведення процесу. Авторами розроблена установка безперервної дії електроактивації води з регулюванням параметрів енергозатрат. Визначено, що використання розчинних залізних катодів та анодів для процесу електролізу забезпечує ступінь очищення води від іонів важких металів в межах 48-68%, тоді як при використанні титанових (ОРТ) анодів цей показник очищення води становить 7-34%. Визначено, що двофазна електроактиваційна обробка води в 2-3 рази знижує вміст важких металів та хлоропідних у питній воді. Досліджено, що на титанових анодах відбувається практично повне очищення від мікроорганізмів. З'ясовано доцільність використання вторинного етапу очищення води за існуючою технологією водопідготовки для отримання показників, які б відповідали стандартам та вимогам питної води.

Ключові слова: поверхневі води, стадія попереднього очищення, установка електроактивації води, оптимальні умови ведення процесу, ступінь очищення.

Постановка проблеми. Вода є найціннішим скарбом, яким забезпечила нас природа. Без води неможливе життя. Вода – будівельний матеріал клітин, розчинник, який надає потрібні поживні речовини організмам і виводить відходи життєдіяльності із організмів. У 2020 році лише 74% населення світу (приблизно 5,8 мільярда людей)

мали доступ до безпечної питної води, залишивши близько 2 мільярдів людей без належного водопостачання [1]. Вода незамінна в господарчій, промисловій та сільськогосподарській діяльності людини.

Вода, яка використовується в господарстві і промисловості, дуже забруднена. В ній нако-

пичуються речовини органічного і мінерального походження, видалення яких з кожним днем стає все складніше і дорожче. Тому будь-які дослідження, спрямовані на скорочення токсичних і хімічно-шкідливих інгредієнтів в промислових стоках і в природній воді, є надзвичайно актуальними і виправдовують свої затрати [2]. Становище ускладнюється ще й тим, що на водопровідних станціях країни прийнята фізико-хімічна технологія водопідготовки, яка включає коагуляцію, відстоювання, фільтрування і хлорування і є бар'єром для хвороботворних вірусів, бактерій, мікроскопічних грибів та водоростей. Однак, хлорування забрудненої органічними речовинами води супроводжується виникненням хлорорганічних речовин, які часто токсичніші вихідних. Вміст їх (наприклад, хлороформу) у питній воді в багатьох випадках перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК), рекомендовані Всесвітньою організацією охорони здоров'я в десятки раз.

Основним актом, що здійснює регулювання цієї проблеми є Водний кодекс України [3], який здійснює регулювання правових відносин з метою забезпечення збереження, науково-обґрунтованого, раціонального використання вод для потреб населення і галузей економіки, відтворення водних ресурсів, охорони вод від забруднення, засмічення та вичерпання, запобігання шкідливим діям вод та ліквідації їх наслідків, поліпшення стану водних об'єктів, а також охорони прав підприємств, установ, організацій і громадян на водокористування.

Вже протягом багатьох років екологічний стан річки Рось, яка є джерелом отримання питної води на Черкащині, не відповідає державним стандартам України та показникам гранично допустимих концентрацій у воді забруднювальних речовин і на сьогодні вже не спроможна самовідновлюватися. Дослідження якості води у річці підтверджували перевищення у воді вмісту нафтопродуктів, органічних сполук, пестицидів та важких металів (свинцю, кобальту, миш'яку та ін.). Забруднення води р. Рось пов'язано зі скиданням в неї недостатньо очищених стічних вод, що призвело до втрати здатності до самоочищення. За останні роки було прийнято чимало розпоряджень та наказів щодо комплексного вирішення проблем басейну річки Рось, а саме розпорядження Кабінету Міністрів України № 648-р від 12 липня 2024 р. «Про затвердження плану дій щодо комплексного вирішення проблем басейну річки Рось на 2024-2030 роки» та наказ Держводагентства №103 від 06 серпня 2024р. «Про затвердження Плану заходів Державного агентства водних ресурсів України з вико-

нання Плану дій щодо комплексного вирішення проблем басейну річки Рось на 2024-2030 роки».

За даними лабораторних досліджень, проведеними науковцями на кафедрі хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету, визначені токсикологічні показники складу води р. Рось, які надані в таблиці 1.

Привертають увагу негативні показники значень: ХСК, БСК, вміст нафтопродуктів, Індекс ЛКП, а також вміст важких металів (фактичні концентрації у воді в районі водозабору «Сівач»).

Основними водокористувачами в басейні річки Рось є 4 водозабори питного водопостачання: Білоцерківський, Богуславський, Миронівський та Корсунь-Шевченківський; водозабори промислових підприємств та водозабори цукрокомбінатів, що забирають воду з р. Рось та її приток. З Білоцерківського водозабору вода подається у м. Умань і м. Узин, питну воду р. Рось споживає близько 500 тисяч людей цих населених пунктів. Україна займає одне з останніх місць серед країн Європи за запасами водних ресурсів у розрахунку на одиницю площі і на одного жителя, але водночас, Україна займає одне з перших місць за рівнем споживання та рівнем забруднення водойм. Всі наші великі ріки за міжнародними стандартами вважаються забрудненими і «дуже забрудненими». Це стосується і більшої частини їх основних приток.

Одним із негативних наслідків технічного прогресу та урбанізації стало зниження якості води річок, водосховищ, які є основним джерелом централізованого питного водопостачання. Погіршення стану природних вод переважно зумовлене скиданням неочищених або недостатньо очищених побутових та промислових стоків, зливом дощовими та талими водами з поверхні водозабору (міст, сіл, сільськогосподарських угідь та ін.), забруднень органічного та неорганічного походження, хвороботворних мікробів. В останні роки збільшилося потрапляння у водоймища суспензій, розчинів та хімічних забруднень, що безпосередньо пов'язано з військовими діями в Україні. Крім того найближчим часом ці явища будуть зростати оскільки органічні речовини та біогенні елементи (Фосфор, Нітроген та інші), що вносяться в природні води, є поживним субстратом для мікроорганізмів, а хімічне забруднення завжди супроводжується інтенсивним вторинним біологічним забрудненням.

Задля істотного зменшення кількості споживаних людиною шкідливих речовин, необхідно

перейти до використання екологічно чистих методів очищення води, до яких відносяться електрофізичні методи очищення. Одним з найважливіших напрямів у розвитку електрофізичних методів інтенсифікації слід вважати використання електроактивованої води [4].

Електрохімічні методи обробки води займають важливе місце серед інших методів очищення природних і стічних вод, що дозволяє відмовитися від використання хімічних реагентів, отримати необхідні реагенти безпосередньо з води, що обробляється. Особливо ефективно використання електрохімічних методів при створенні безвідходних і маловідходних технологій в замкнутих системах водного господарства, де введення будь-якої речовини обов'язково призводить до її накопичення. Електрохімічний метод очищення є універсальним методом зниження концентрації токсичних сполук та зниження вмісту органічних сполук при співосажденні.

Основне призначення методу електроактивації – одержання очищеної питної води, причому очищення відбувається практично всіх елементів

забруднення: солі металів, віруси, нітроти, гербіциди, феноли, органіка – усе розпадається на іони й випадає у вигляді осаду або утворюється у вигляді газу в атмосферу. Після осаждення домішок окремо в католіті та аноліті, які є рідкими продуктами електроактивації води, та відділення осадів очищені розчини об'єднуються, взаємно нейтралізуючись, що приводить до комплексного очищення води. При цьому питна вода стає біологічно активною, що істотно поліпшує обмін речовин в організмі людини. Дуже важливо, що аноліт є м'яким антисептиком і антибіотиком, а католіт – імуностимулятором і радіопротектором, який захищає від радіоактивних випромінювань [5]. Після електрохімічної обробки воду доцільно направляти на стадію стандартної водопідготовки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод електричної активації, розроблений співробітниками Середньоазіатського НДІ природного газу (м. Ташкент) у 1972 році, в основі якого покладений давно відомий хімічний процес, який проходить при пропусканні струму через роз-

Таблиця 1

Токсикологічні показники складу води р. Рось

Показники якості води р. Рось	ГДК за ДСанПіН (2.2.4-171-10)	Фактичні показники в с.м.т Стеблів, вище ГЕС	Фактичні показники на водозаборі «Сівач»	Гранично допустимі концентрації (ГДК)		
				Україна	КЕС	ВООЗ
Запах, бали	–	1	1	2	3	3
Кольоровість, град	–	25	25	20	20	15
Мутність, мг/дм ³	–	2,8	3,8	1,5	5	5
Водневий показник, рН	6,5-8,5	6,4	6,4	6-9	6,5-8,5	6,5-8,5
Прозорість за Снелленом, см	–	30	30	–	–	–
Завислі речовини, мг/дм ³	–	7,4	9,2	–	–	–
Розчинний кисень	4	5,2	5,6	–	–	–
Хлориди, мг/дм ³	350	48	53,54	350	250	250
Сульфати, мг/дм ³	500	42/72	33/73			
Амоній сольовий, мг/дм ³	2,56	0,46	1,2	0,5	2,0	0,5
Нітроти, мг/дм ³	3,3	0,035	0,053	–	–	–
Нітрати, мг/дм ³	45	2,25/9,4	2,25/15,6	20	10	10
Жорсткість, мг-екв/дм ³	7	6,6	5,525	–	–	–
ХСК, мг/дм ³	15	95,4	81,0	–	–	–
БСК ⁵ , мг/дм ³	3	5,3	4,5	–	–	–
Залізо загальне мг/дм ³ ,	0,3	0,35	0,39	0,3	0,3	0,3
Вміст важких металів, мг/дм ³	–	4,8	4,8	–	–	–
Кальцій, мг/дм ³	–	58,1	62,6	–	–	–
Магній, мг/дм ³	–	45	42,6	–	–	–
Нафтопродукти мг/дм ³	0,3			–	–	–
Індекс ЛКП, в 1 дм ³	–	600	2300	–	–	–
Сухий залишок, мг/дм ³	–		892	–	–	–

чин електроліту – електроліз. Вчений Бахір В.М. звернув увагу на те, що процес електролізу слабомінералізованої води за наявності діафрагми, яка відокремлює зону розташування аноду від зони розташування катоду, суттєво відрізняється від традиційних процесів, які протікають відповідно до класичних законів електролізу. Водночас властивості води, що зазнала електрохімічної обробки, визначаються як початковою кількістю та складом мінеральних солей, так і параметрами електрохімічного впливу. В.М. Бахір запропонував називати це явище «електрохімічною активацією води» [6]. Новизна дослідного способу активації полягає у виключенні процесу перемішування електроліту.

При електричному способі активації води різко змінюються її властивості (електропровідність, поверхневий натяг, густина, окисно-відновний потенціал, рН, діелектрична проникність). Змінити ці властивості можна цілеспрямовано: так величину рН можна змінювати в межах 2-12, отримуючи таким чином середовище яке сприяє для позитивного процесу обробки тканин, який використовують в легкій промисловості [4, 7]. Активована вода використовується також в медицині, для очищення стічних вод; у виноробстві; в гірськозбагачувальній промисловості; нафтовидобувній промисловості та інших.

Науковці [8] займалися вирішенням проблем вилучення залишкових концентрацій радіоактивного ^{137}Cs із слабоактивних водних розчинів електролізно-мембранним способом очищення води, як складового чинника технології Плазма-Сорб (розробка ДУ ІГНС НАНУ). У роботі використовували штучно приготовлену слабоактивну радіоактивну воду із ґрунту АЕС Фукусіми [9]. Електроактивацію досліджуваної води проводили тричі протягом 60-70 хв, з нагріванням води до 85°C . Після першого електролізно-мембранного очищення води радіоактивність води зменшилася в 1,29 рази з вилученням до 77% іонів ^{137}Cs , після другого – в 1,59 рази з вилученням 63% іонів ^{137}Cs , після третього – повне очищення води та 100% вилучення іонів ^{137}Cs , що робить дану технологію перспективною в межах водопідготовки.

У роботі [10] запропоновано новий метод електричної активації води, який відрізняється від існуючих тим, що енергія для установки електрохімічної активації генерується за рахунок руху водних мас. Очікується, що на практиці електрична активація води частиною кінетичної енергії, зосередженої в її потоці, сприятиме мінімізації втрат у процесі подачі води на зрошування куль-

тур, що значно підвищить їх врожайність шляхом збільшення енергії рослин щодо проростання і схожості рослин.

Вчені з Латвії [11] досліджували знезараження питної води електролізом. Електрохімічна дезінфекція водопровідної води за допомогою нестехіометричних електродів з оксиду титану була достатньо ефективною для інактивації як метаболічно активних, так і культивованих бактерій *E. coli* до невизначуваного рівня протягом 15 хвилин при силі струму 0,5 А.

Науковці Черкаського державного технологічного університету досліджували ефективність використання методу електроактивації для очищення підземних вод. У ході досліджень визначено, що найбільший вплив на показник ступеня очищення чинить підвищення значення параметру напруги, оскільки при найменшій застосованій напрузі у 10В ступінь очищення становить 30,8%, а при максимально застосованій напрузі у 18 В – 53,2%. Найменший вплив чинить показник часу проведення електроактивації. Оскільки при напрузі в 12 В та тривалості процесу ступінь очищення становить лише 26,9%, що майже в два рази менше, ніж ступінь очищення води, отриманий при застосованій напрузі у 18 В та часу 600 с, а саме – 53,2% [12].

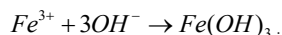
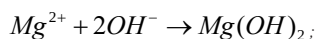
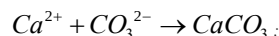
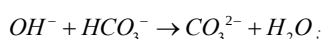
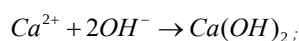
Мета статті – вивести на стаціонарний режим лабораторну установку електрохімічної активації; провести очищення води від органічних домішок та іонів важких металів при мінімальному значенні сили струму на залізних катодах, залізних та титанових (рутеній оксид на титані – ОРТ) анодах; визначити максимальний ступінь очищення та обґрунтувати оптимальні умови ведення процесу; теоретично обґрунтувати та експериментально підтвердити доцільність використання процесу електроактивації, як ресурсозберігального методу, для попереднього очищення природної води.

Об'єктом дослідження була вода з річки Рось Корсунь-Шевченківського водозабору Черкаської області (Україна). Предметом дослідження є умови зниження концентрації токсичних з'єднань з використанням електроактивації; визначення оптимальних гідродинамічних та енергетичних показників на лабораторній стендовій установці електроактивації.

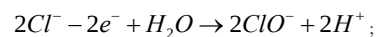
Дослідження ефективності очищення проб води за допомогою здійснено аналітичними, фізико-хімічними та органолептичними методами аналізу.

Виклад основного матеріалу. Електроактивація води заснована на переносі іонів та електронів

крізь напівпроникну мембрану, поміщену в розчин електроліту, при створенні в рідині різниці потенціалів з обох боків мембрани. У процесі електроактивації в катодній камері утворюється католіт – лужна («жива») вода, в анодній – аноліт, кислотна («мертва») вода. Токсичні сполуки осаджуються у вигляді гідроксидів, або надходять у вигляді газів в атмосферу [13]. При використанні проникних мембран рух Гідроксид-іонів, що утворилися, не асоціюється з катіонами Гідрогену, а підвищує рН катодного розчину до 10–12, знижуючи рН анодного розчину до 2–3. При цьому досягається 70–80% виходу за струмом із зниженням жорсткості води. Під впливом вільних гідроксид-іонів можливе протікання декількох конкуруючих реакцій у прикатодному просторі:



Електрохімічний метод очищення є універсальним методом зниження концентрації іонів важких металів; при підвищенні рН катодного розчину до 10–12 спостерігається осадження гідроксидів металів та зниження вмісту органічних сполук при співосажденні. Присутність іону хлору приводить до утворення ряду оксигеновмісних іонів за відомим механізмом електродних реакцій біля аноду:



В анодному просторі електроактиватора знижується рН і середовище стає кислим. Величина рН та значення окисно-відновного потенціалу (ОВП) впливають на фізико-хімічні та біохімічні процеси, які відбуваються при видаленні з води забруднювачів. Так в процесі окиснення, відновлення, дисоціації або комплексоутворення з регулюванням рН можна змінити окисно-відновний потенціал, напрям та швидкість хімічних реакцій, окисно-відновну активність речовин в розчині, стійкість комплексних сполук, а при біохімічному очищенні води – гальмувати життєдіяльність бактерій та змінювати каталітичну активність ферментів. Електрохімічна активація також приводить до знезараження води через те, що у розчині натрій хлориду утворюється аніон гіпохлориду, що сприяє процесу очищення. Зниження вмісту органічних сполук можна пояснити їх співосажденням на колоїдних частинках у катодній області та з частковим окисненням розчинених органічних речовин на аноді.

Таким чином, електрохімічний метод очищення є універсальним методом очищення води. До переваг методу можна віднести: можливість використовувати метод в присутності органічних сполук; заміна напівпроникних перегородок на проникні; простота конструкції та можливість її удосконалення; мінімізація витрат та можливість видалення солей у вигляді осаду.

Для проведення досліджень використовували лабораторний електроактиватор безперервної дії,

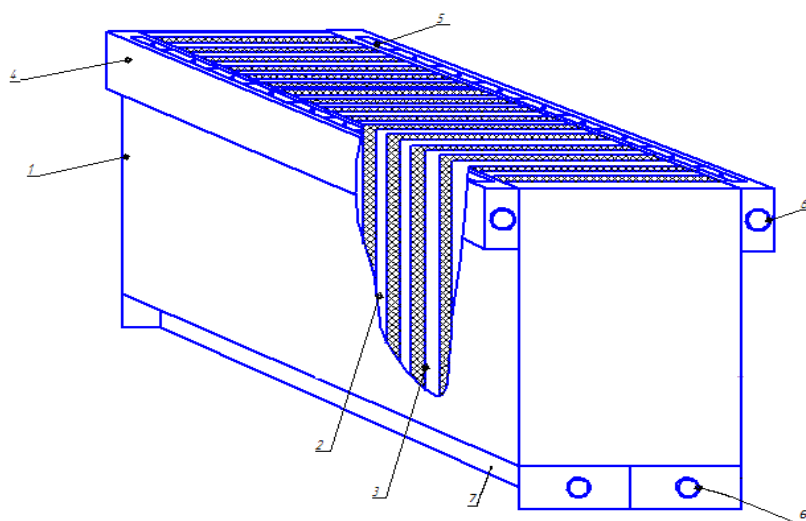


Рис. 1. Ескіз лабораторної установки для електроактивації води:
1 – емкість; 2 – електрод; 3 – мембрана; 4 – камера відведення води;
5 – клеми; 6 – штуцер; 7 – камера підведення води

що дозволяє очищувати 2-3 м³/годину води. Ескіз установки для електроактивації води представлено на рис. 1.

Фото стендової установки електроактивації води надано на рис. 2.

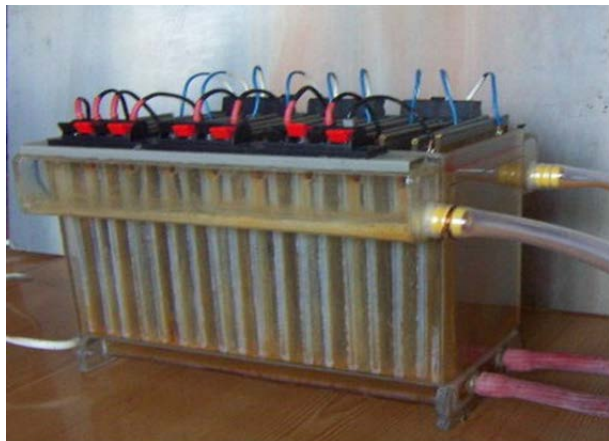


Рис. 2. Фото стендової установки електроактивації води

Основна ємкість виконана з органічного скла, прозорої пластмаси на основі поліметилметакрилату (пексиглас). Перевагами над звичайним склом є мала густина, вища міцність, добра технологічність: легко формується у виробі, обробляється різанням, добре зварюється, склеюється, характеризується доброю оптичною прозорістю (92%). Ємкість облаштована направляючими для точного герметичного встановлення напівпроникних мембран та сталевих електродів (для 17 мембран та 18 електродів). Направляючі проклеєні по низу та стінках апарату з кроком 15 мм для

мембран та 17 мм для електродів, виготовлені з тонкого, еластичного плексигласу. Зовні, у верхній частині ємкості приєднані дві продовгуваті камери, в які здійснюється відведення води з основної ємкості через отвори: католіт в одну камеру, аноліт в іншу. Вода з камер відведення витікає через штуцери. Знизу під донною частиною ємкості розташовані дві камери зі штуцерами для підведення води. Підведення води відбувається окремо для анодних та катодних камер через отвори в дні основної ємкості. Основна ємкість розділена на 18 рівних камер напівпроникними мембранами, в кожній з яких знаходиться сталевий катод. Сталеві електроди виконані зі сталі ст 3. Аноди виготовлено з рутеній оксиду на пористому титані. Анодний і катодний електроди утворюють дві групи, які чергуються, тобто група з'єднаних між собою анодних і окремо катодних пластин. Електрод є пластиною, до якої під'єднаний провідник живлення, з'єднаний із клеюю; група анодних електродів під'єднана до негативної клема живлення, а група катодних – до позитивної клема живлення. Клеми розміщені зверху на двох бокових камерах відведення. Напівпроникна мембрана виготовлена з бавовняної фільтрувальної тканини «Діагональ», що виконує функцію діафрагми між катодом і анодом, тобто призначена для запобігання вільного переносу іонів під дією електричного струму. Мембрана натягнута на рамку, виготовлену з вінілпласту.

Методика проведення експериментів. Проба води, попередньо відстояна та профільтрована крізь піщаний фільтр від механічних домішок та завислих речовин, завантажується в електроактиватор. Задается швидкість витікання, залежно від умов прове-

Таблиця 2

Ступінь очищення води р. Рось від іонів важких металів

Іони важких металів									
Fe ⁺²		Cr ⁺⁶		Cu ⁺²		Cd ⁺²		Pb ⁺²	
Матеріал аноду									
Fe	Ti	Fe	Ti	Fe	Ti	Fe	Ti	Fe	Ti
Ступінь очищення, %									
Не визначено		57,17	28,26	68,08	34,6	52,86	24,62	48,78	7,57

Таблиця 3

Ступінь очищення води від домішок

№	Параметри проведення процесу			Результати експерименту				
	I, A/ U, B	P, Вт/Е, кВт год/дм ³	V, мл	Жорсткість, мг–екв./дм ³	Сухий залишок, г/дм ³	Cl, мг/дм ³	Органічні домішки, мг/дм ³	pH кат
1	13/20	260/80,2	600	1,575	564	15,54	65	10
2	8/21	168/51,9	1200	1,675	326	25,91	50	9,5
3	6/21	126/38,9	1600	0,8	220	38,64	40	10

Таблиця 4

Ступінь очищення води від хлоридів

№	Жорсткість, мг/дм ³			Хлориди, мг/дм ³		
	вихідна вода	очищена вода	стічна вода очищена, %	вихідна вода	очищена вода	стічна вода очищена, %
1	5,525	1,575	71,49	53,54	15,54	70,97
2	5,525	1,675	69,68	53,54	25,91	51,61
3	5,525	0,8	85,52	53,54	8,64	83,86

Таблиця 5

Ступінь очищення води від сухого залишку

№	Жорсткість, мг/дм ³			Сухий залишок, г/дм ³		
	вихідна вода	очищена вода	стічна вода очищена, %	вихідна вода	очищена вода	стічна вода очищена, %
1	5,525	1,575	71,49	892	564	36,77
2	5,525	1,675	69,68	892	326	63,45
3	5,525	0,8	85,52	892	220	75,34

Таблиця 6

Ступінь очищення води від органічних домішок

№	Жорсткість, мг/дм ³			ХСК, мгО ₂ /дм ³		
	вихідна вода	очищена вода	стічна вода очищена, %	вихідна вода	очищена вода	стічна вода очищена, %
1	5,525	1,575	71,49	81	65	35
2	5,525	1,675	69,68	81	50	50
3	5,525	0,8	85,52	81	40	60

дення досліджу, підключається джерело живлення. Під час проведення дослідження змінюються параметри: сила струму, об'єм відібраної проби, швидкість витікання води, час проведення досліджу. Відібрані проби відстоюються протягом 2-х годин, фільтруються крізь фільтр «синя стрічка» та аналізуються на вміст хлоридів, визначається жорсткість, сухий залишок та ХСК за стандартними методиками [14]. З метою видалення грубодисперсних речовин, досліджувану воду попередньо фільтрують крізь паперовий складчастий фільтр. Попереднє очищення води, склад якої представлено в таблиці 1, проводили за такими технологічними параметрами: густина струму 1,0-1,5 А/дм², затрати електроенергії відповідно дослідів (в кВт·год/м³): дослід №1 – 2,5; дослід №2 – 3,8; дослід №3 – 5,1. Отримані результати, представлені в таблицях 2–6 та рис. 3–4.

На розчинних залізних катодах та анодах спостерігається більш повний ступінь очищення від іонів важких металів у кінцевій воді, ніж на ОРТ-анодах.

У табл. 3 вихідні дані проб: жорсткість = 5,525 мг-екв./дм³; сухий залишок = 892 г/дм³; хлориди = 53,54 г/дм³; ХСК = 81 мгО₂/дм³; рН = 6,4.

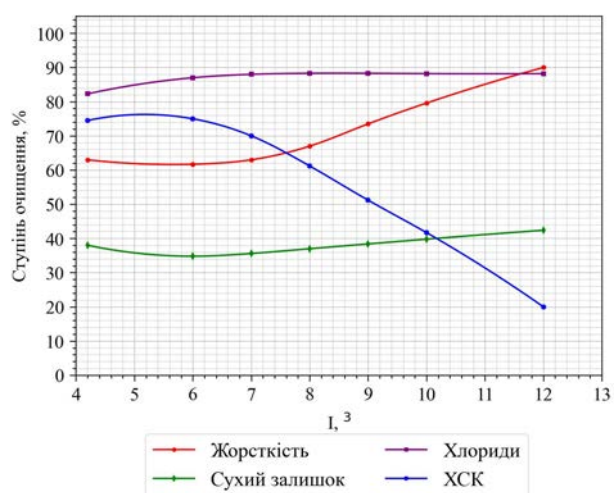


Рис. 3. Залежність ступеня очищення води від сили струму

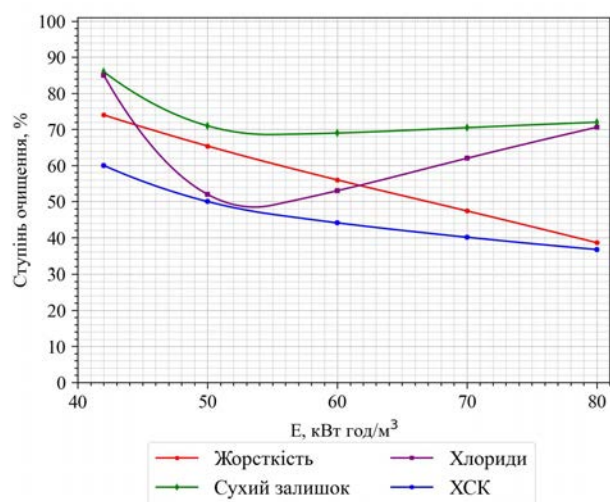


Рис. 4. Залежність ступеня очищення води від спожитої електроенергії (обґрунтування оптимальних умов ведення процесу)

Отримані практичні результати свідчать, що застосування методу електроактивації води сприяє досягненню високого ступеня очищення річкової води.

Висновки.

1. У процесі електрохімічної активації відбувається значне очищення води від іонів важких металів, мікроорганізмів та органічних сполук.

2. Розроблено ресурсозберігальну технологію інтенсифікації процесів очищення природних вод за допомогою електроактивації шляхом отримання католіту та аноліту.

3. Розроблена установка безперервної дії з регулюванням параметрів енергозатрат.

4. Отримані експериментальні дані, що підтверджують ефективність очищення природної води методом електроактивації.

5. Визначено, що на розчинних залізних катодах та анодах спостерігається більш повна ступінь очищення води від іонів важких металів у кінцевій воді, ніж на ОРТ-анодах.

6. На ОРТ-анодах спостерігається практично повне очищення від мікроорганізмів.

7. Пропонується двоступінчаста електроактиваційна обробка води: спочатку на залізних анодах, а потім на ОРТ-анодах.

8. Для отримання показників, які б відповідали стандартам та вимогам питної води, після первинного процесу електроактиваційного очищення доцільно використовувати вторинний етап очищення за існуючою технологією водопідготовки.

9. Застосування попередньої стадії електроактивації в 2-3 рази знижує вміст важких металів та хлоропідних у питній воді.

Список літератури:

1. Costa J. M. Considerations on Electrochemical Technologies for Water Purification and Wastewater Treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 20 (12). P. 61–76. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20126140>.
2. Гончарук В. В. Хімія і технологія води. К.: Наукова думка, 1994. – т. 14, № 8, 467 с.
3. Водний кодекс України, № 213/95-ВР. Київ, 1995, доповнення 2024. С. 1–45. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 10.08.2025).
4. Романенко Н. Г. Фізико-хімічні основи застосування електроактивованих водних систем в технологіях опорядження текстильних матеріалів. Дис. докт. техн. наук. Херсон, 2003. 374 с.
5. Device for electroactivization of fluids: pat. US5307235A United States: A61L9/22; Application 23.03.1992; Publication 26.04.1994. URL: <https://patents.google.com/patent/US5307235A/en> (дата звернення: 01.08.2025).
6. Ромащенко М.І., Конаков Б.І., Поліщук В.В., Усатий С.В. Електрохімічно активована вода (EXAB): історія відкриття, специфіка процесу, сучасний стан та перспективи її застосування при зрошенні. *Меліорація та водне господарство*. 2021. № 2. С. 177–189. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-291>.
7. Діхтяренко М. Г. Створення безаміачної технології пігментного друку текстильних матеріалів із використанням електроактивованих водних систем. Автореф. дис. канд. наук. Херсон, 2008. 24с.
8. Гузій С., Лук'янова В., Ніколенко В., Пугач О., Возинщик А., Машкіна І., Носенко Т. Застосування електролізно-мембранних технологій для очищення слабоактивних радіоактивних вод. V Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки». Київ, НУХТ, 2024. С. 112–114.
9. Guzii S., Arkhypenko O., Odukalets L., Prysiazna, O. Magnetite-ferrocyanide-copper sorbents for recovery of cesium ions from low-activity liquid radioactive waters. *Material Science & Engineering International Journal*. 2024. Vol. 8 (1). P. 15–18. DOI: 10.15406/mseij.2024.08.00230.
10. Iosifov V. P., Melikov A. V., Matveev A. I., Shchukina V. N. The water electric activation method with a part of energy concentrated in its flow. IOP Conference Series: Earth and Environmental Scienc. *Mathematical Modeling of Technical and Economic Systems in Agriculture*. 2021. Vol. 1069. P. 1–5. DOI 10.1088/1755-1315/1069/1/012007. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1069/1/012007/pdf>.

11. Reimanis M., Mezule L., Ozolins J., Malers J., Juhna T. Drinking Water Disinfection with Electrolysis. *Latvian Journal of Chemistry*. 2013. Vol. 51 (4). P. 296–304. DOI: 10.2478/v10161-012-0016-9.
12. Козоріз І. А., Столяренко Г. С., Тупицький Б. І. Очищення підземних вод методом електроактивації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2017. № 2. С. 25-32.
13. Device for electroactivating fluids and preparations consisting of electroactivated fluids: pat. AU5846590A Australia: C02F1/4618; Application 13.06.1990; Publication 08.01.1991. URL: <https://patents.google.com/patent/AU5846590A/en> (дата звернення: 01.08.2025).
14. Солодовнік Т. В. Аналітична хімія: практикум: навч. посіб. М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Вид. 2-ге, доп. Черкаси: видавець Гордієнко Є.І, 2020. 308 с. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/1005> (дата звернення: 15.07.2025).

Stoliarenko H.S., Koval M.G., Fomina N.M. ELECTROACTIVATION AS A RESOURCE-SAVING METHOD IN SURFACE WATER TREATMENT TECHNOLOGY AT THE WATER PREPARATION STAGE

One of the most valuable treasures that nature has given us is water. The water used in agriculture and industry is heavily polluted. It accumulates organic and mineral substances, which are becoming increasingly difficult and expensive to remove. Therefore, any research aimed at reducing toxic and chemically harmful ingredients in industrial wastewater and natural water, and creating resource-saving water purification technologies, is extremely relevant and justifies its costs.

The article is devoted to the electrochemical method of water treatment, which occupies an important place among other methods of natural and wastewater treatment, allowing the use of chemical reagents to be abandoned.

The article highlights the problem of water pollution in the Ros River in the Cherkasy region, the quality of which has been confirmed by studies showing excessive levels of petroleum products, organic compounds, pesticides and heavy metals, which is the result of the discharge of insufficiently treated wastewater into the river. In the article, the authors highlight the creation of a resource-saving technology for intensifying natural water purification processes using electroactivation by obtaining catholyte and anolyte.

The article discusses the purification of river water from organic impurities and heavy metal ions by electroactivation at minimum current strength on iron cathodes and iron and titanium anodes; the maximum degree of purification is determined and the optimal conditions for conducting the process are substantiated. The authors have developed a continuous-action water electroactivation unit with energy consumption parameter control. It has been determined that the use of soluble iron cathodes and anodes for the electrolysis process provides a degree of water purification from heavy metal ions within the range of 48-68%, while when using titanium (OPT) anodes, this water purification rate is 7-34%. It has been determined that two-stage electroactivation treatment of water reduces the content of heavy metals and chlorine derivatives in drinking water by 2-3 times. It has been found that titanium anodes provide almost complete purification from microorganisms. The feasibility of using a secondary stage of water purification using existing water treatment technology to obtain indicators that meet drinking water standards and requirements has been established.

Key words: surface water; preliminary treatment stage, water electroactivation unit, optimal process conditions, degree of purification.

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 19.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 661.12:001.891

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/33>**Федоренко В.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

Бегдай А.О.

Київський національний університет технологій та дизайну

Яременко В.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Гой А.М.

Київський національний університет технологій та дизайну

Іщенко О.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Бессарабов В.І.

Київський національний університет технологій та дизайну

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВАЛІДАЦІЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНОЇ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНОГО ВМІСТУ РИВАРОКСАБАНУ У ТВЕРДИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМАХ

Значна кількість сучасних активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ), включаючи ривароксабан, характеризується низькою розчинністю, що обмежує їх біодоступність та терапевтичну ефективність. Відомо, що включення АФІ у полімерні тверді дисперсні системи (ТДС) є одним з перспективних підходів для підвищення розчинності. Ефективна розробка та контроль якості таких інноваційних форм потребує створення надійних та валідованих аналітичних методик. Тому, метою даного дослідження було розроблення та валідація простої, точної, специфічної та робасної спектрофотометричної методики кількісного визначення ривароксабану у складі полімерних ТДС для забезпечення надійного аналітичного інструменту контролю якості. Тверді дисперсні системи ривароксабану готували з різними фармацевтично прийнятними полімерними носіями, а кількісне визначення ривароксабану проводили з використанням УФ-спектрофотометричного методу аналізу. Валідація розробленої методики здійснювалася згідно з вимогами ICH Q2(R1) за такими параметрами, як специфічність, лінійність, прецизійність (збіжність, відтворюваність) та робасність, використовуючи стандартні статистичні підходи для аналізу даних. Отримані результати підтвердили високу специфічність методики, оскільки максимуми спектрів ривароксабану не перекривалися з максимумами спектрів компонентів ТДС. Продемонстровано лінійність у діапазоні концентрацій 80-120% від номінальної, з коефіцієнтом кореляції $R^2 = 0,993$. Методика також показала високу прецизійність, де значення довірчих інтервалів для збіжності та відтворюваності знаходилися в межах встановлених критеріїв ($<1,0\%$). Крім того, дослідження робасності виявило стійкість методики до незначних змін довжини хвилі детектора, що підтверджено низьким відносним стандартним відхиленням (1,101%). Таким чином, розроблена спектрофотометрична методика кількісного визначення ривароксабану у полімерних твердих дисперсних системах є валідованою та повністю відповідає вимогам до аналітичних методик. Вона є надійним інструментом для контролю якості та має значний потенціал для застосування у подальшій розробці та оптимізації нових ТДС ривароксабану, сприяючи кількісній оцінці впливу полімерних матриць на підвищення його розчинності.

Ключові слова: ривароксабан, тверді дисперсні системи, валідація, активний фармацевтичний інгредієнт, спектрофотометрія, кількісне визначення, аналітична методика.

© Федоренко В.В., Бегдай А.О., Яременко В.В., Гой А.М., Іщенко О.В., Бессарабов В.І., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Сучасна хіміко-фармацевтична індустрія постійно стикається з викликом розробки та впровадження нових лікарських засобів, які б не лише демонстрували високу фармакологічну активність, а й володіли оптимальними фармакокінетичними властивостями, зокрема біодоступністю [1]. Значна частина потенційних лікарських субстанцій, включаючи молекули з високою ефективністю дії, мають низьку розчинність у воді. Це є глобальною проблемою, оскільки низька розчинність прямо корелює з неповною та варіабельною абсорбцією з шлунково-кишкового тракту, що, у свою чергу, призводить до зниження біодоступності, необхідності застосування високих доз та, як наслідок, підвищення ризику побічних ефектів або зниження терапевтичної відповіді [1, 2, 3].

Саме тому розробка стратегій, спрямованих на підвищення розчинності та швидкості розчинення важкорозчинних активних фармацевтичних інгредієнтів, є одним із пріоритетних напрямків у фармацевтичній технології [1, 4]. Однією з найбільш ефективних та активно досліджуваних технологій є формування твердих дисперсних систем, що передбачає диспергування АФІ у полімерній матриці. Впровадження інноваційних методів отримання твердих дисперсних систем (ТДС), дозволяє створювати унікальні лікарські форми з високою площею поверхні та зміненим агрегатним станом АФІ, що сприяє значному покращенню розчинності [4, 5].

У цьому контексті, ривароксабан, як представник АФІ з низькою розчинністю, є яскравим прикладом, для якого покращення біодоступності є критично важливим для оптимізації антикоагулянтної терапії. А розробка нових ТДС ривароксабану є важливим кроком у вирішенні цієї проблеми [6].

Проте, створення нових фармацевтичних форм потребує надійної аналітичної підтримки на всіх етапах розробки та контролю якості. Кількісне визначення АФІ в складних полімерних матрицях ТДС є непростим завданням, оскільки матричні компоненти можуть впливати на аналітичний сигнал та точність вимірювань [7]. Існуючі методики часто не адаптовані до специфіки ТДС, отриманих новими методами, і не враховують можливі взаємодії з полімерними носіями або наявність продуктів розкладу. Це створює гостру потребу у розробці та валідації специфічних, точних, прецизійних та робасних аналітичних методик, здатних забезпечити достовірний кількісний аналіз АФІ без впливу матриці [8].

Таким чином, основна проблема полягає у відсутності комплексно валідованої та оптимізованої спектрофотометричної методики, яка була б адаптована спеціально для кількісного визначення ривароксабану у полімерних ТДС [7, 8]. Це є не лише актуальним науковим завданням, а й має значне практичне значення для розвитку сучасної фармацевтичної технології та забезпечення потреб охорони здоров'я.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значущою проблемою сьогодення є висока поширеність серцево-судинних захворювань, зокрема тромбоемболічних розладів, які залишаються однією з провідних причин смертності в усьому світі. Ключовою терапевтичною стратегією для профілактики та лікування цих станів є застосування антикоагулянтів. Серед них, ривароксабан, потужний та високоселективний прямий інгібітор фактора Ха, займає провідне місце завдяки своїй ефективності та зручності перорального застосування [1].

Однак, незважаючи на виражену фармакологічну дію, клінічне застосування ривароксабану ускладнюється його фізико-хімічними властивостями. За біофармацевтичною системою класифікації (БСК) ривароксабан належить до II-го класу, що характеризується високою проникністю, але вкрай низькою розчинністю, яка становить лише 5–7 мг/л у фізіологічному діапазоні рН [6]. Ця низька розчинність є лімітуючим фактором для його абсорбції, що призводить до значної залежності біодоступності від прийому їжі, особливо для високих терапевтичних доз. Це створює потенційні ризики непередбачуваної терапевтичної відповіді та зниження ефективності лікування [8]. Тому розроблення інноваційних технологічних підходів для підвищення розчинності ривароксабану є надзвичайно актуальним завданням сучасної науки.

Так, одним із найефективніших та найпоширеніших методів для вирішення проблем, пов'язаних з низькою біодоступністю важкорозчинних АФІ, є технологія твердих дисперсних систем [1, 4]. ТДС – це системи, в яких один, або декілька АФІ дисперговані в інертній матриці. Підвищення розчинності досягається за рахунок переходу кристалічної речовини в більш енергетично вигідну аморфну форму, зменшення розміру частинок до молекулярного рівня та покращення змочуваності [5]. Для створення ТДС ривароксабану часто використовують такі полімери, як полівінілпіролідон (ПВП), поліетиленгліколи (ПЕГ), гідроксипропілметилцелюлозу (ГПМЦ) та гідроксипропілцелюлозу (ГПЦ) [5, 9].

Для одержання коректних результатів щодо ступеня підвищення розчинності ривароксабану у складі ТДС необхідно підібрати відповідну методику кількісного визначення АФІ. Методика має бути простою, точною, відтворюваною та специфічною. Проте, саме полімерні носії чи поверхнево-активні речовини можуть створювати значні аналітичні проблеми, оскільки багато з них поглинають світло в УФ-діапазоні [10, 11].

Кількісне визначення ривароксабану у лікарських формах здійснюють переважно хроматографічними та спектрофотометричними методами [12]. Однак найпоширенішим методом для рутинного контролю якості, зокрема для аналізу великої кількості зразків у тестах на розчинення, залишається метод абсорбційної спектрофотометрії в УФ-області через його простоту, швидкість та відносно низьку вартість [13].

У науковій літературі описано значну кількість спектрофотометричних методик для визначення ривароксабану. Найпростіші з них базуються на прямому вимірюванні УФ-поглинання, проте вибір аналітичної довжини хвилі сильно залежить від розчинника: в диметилсульфоксиді (ДМСО) максимум поглинання (λ_{max}) спостерігається при 270 нм [13], у суміші ацетонітрилу та води при 250 нм [12], у метанолі – при 254 нм, а в середовищі для розчинення (ацетатний буфер рН 4,5 з 0,4% натрію додецилсульфату) – при 248 нм [14].

Більш селективні підходи передбачають використання хромогенних реакцій, що дозволяє перенести вимірювання у видиму область спектра, де полімери зазвичай не поглинають. Наприклад, описано методику, що базується на окисненні ривароксабану хлоридом заліза (III) з подальшим утворенням забарвленого комплексу з 1,10-фенантроліном. Інший підхід полягає в утворенні основи Шиффа з 4-амінофеназоном [14], або в реакції комплексоутворення з переносом заряду з хлоранілом, що дозволяє проводити вимірювання при 655 нм [14].

Водночас, методики з використанням хромогенних реагентів часто є багастадійними, довготривалими та можуть потребувати використання токсичних органічних розчинників [8]. Тому розширення арсеналу простих, швидких та специфічних спектрофотометричних методів для кількісного визначення ривароксабану безпосередньо у складних матрицях, якими є ТДС, досі залишається актуальним завданням.

Метою роботи є розроблення валідація простої, точної, специфічної та робасної спектро-

фотометричної методики кількісного визначення ривароксабану у полімерних твердих дисперсних системах. Валідована методика має забезпечити надійний аналітичний інструмент для контролю якості та подальшої оптимізації інноваційних лікарських форм ривароксабану, спрямованих на підвищення його розчинності та біодоступності.

Виклад основного матеріалу. При виконанні експериментальних робіт використовувалися наступні реактиви: ривароксабан (Assia Chemical Industries Ltd, Ізраїль); полівінілпіролідон K-12 (BASF SE, Німеччина); полівінілпіролідон K-17 (ISP Technologies Inc, США); полівінілпіролідон K-25 (Boai NKY Medical Holdings Ltd., Китай); гідроксипропілметилцелюлоза (Nutrition & Biosciences USA 1 LLC (Plaquemine Methocel), США); гідроксипропілцелюлоза (Nippon Soda Co., Ltd., Японія); цукор (ВП «Яресківський цукровий завод» ТОВ «Агрофірма ім. Довженка», Україна); маніт (Merck KGaA, Німеччина); ацетонітрил (Sigma-Aldrich, Німеччина), вода очищена.

У процесі досліджень використовували наступні допоміжні матеріали та обладнання: апарат для виготовлення цукрової вати (КНР); ваги аналітичні AS 60/220. R2 (Radwag, Польща); лабораторний апарат водопідготовки RO-4 (Werner, Німеччина); лабораторна мікроцентрифуга CM-3 (Micromed, КНР); кювети з кварцового скла з оптичним шаром завтовшки 1 см (Agilent, США); пробірки типу Eppendorf об'ємом 2 мл; таймер; УФ-спектрофотометр OPTIZEN POP (Mecasys, Південна Корея); одноканальні напівавтоматичні дозатори об'ємами 50, 200, 1000 мкл (Dragon-Lab, Китай); термостат для кювет DB-10C (Biosan, Латвія); лабораторний посуд.

Методика отримання твердих дисперсних систем, що містять ривароксабан. На першому етапі готували гомогенну суміш ривароксабану з полімерним носієм. Далі підготовлену суміш поміщали в робочу головку апарату для виготовлення цукрової вати, та нагрівали до утворення однорідного розплаву компонентів. Температура процесу складала 160–200 °С. Після цього запускали обертання робочої головки апарату, в якій за рахунок відцентрової сили, що виникала при обертанні, гомогенний розплав проходив через фільтри та миттєво застигав у формі тонких волокон твердих дисперсій ривароксабану.

Приготування розчину активного фармацевтичного інгредієнта. Необхідну кількість АФІ зважували, переносили в мірну колбу та додавали розчин ацетонітрилу та води очищеної в пропорції 1:1. Далі перемішували до повного розчинення

компонентів та тим самим розчинником доводили до необхідного об'єму. Отриману суміш перемішували на термошейкері за температури 25 °С протягом 30 хв та центрифугували зі швидкістю 6 000 об/хв впродовж 20 хв. Відбирали з розчину пробу та проводили її аналіз.

Приготування розчину полімеру. Необхідну кількість полімерного матеріалу зважували, переносили в мірну колбу та додавали воду очищену. Далі перемішували до набуття сумішшю гомогенного стану та доводили об'єм до позначки водою очищеною. Отриману суміш перемішували на термошейкері протягом 30 хв за температури 25 °С та центрифугували зі швидкістю 6 000 об/хв впродовж 20 хв. Відбирали надосадову рідину та проводили її аналіз.

Приготування розчину ТДС ривароксабану. Тверді дисперсні системи ривароксабану, які отримували за допомогою методу відцентрового формування волокон, подрібнювали у ступці та зважували. Далі отриманий порошок переносили у мірну колбу та додавали воду очищену, перемішували, доводили об'єм розчину до позначки тим самим розчинником. Отриману суміш перемішували на термошейкері протягом 30 хв за температури 25 °С та центрифугували зі швидкістю 6 000 об/хв впродовж 20 хв. Відбирали надосадову рідину та проводили її аналіз.

Валідаційні характеристики методики визначення кількісного вмісту ривароксабану у твердих

дисперсних системах. Валідаційна характеристика – це незалежний від техніки вимірювання опис характеристики, яка забезпечує якість вимірюваного результату. Тому, для підтвердження якості виконаних аналізів визначення кількісного вмісту ривароксабану в ТДС було виконано наступні валідаційні тести: специфічність/селективність, лінійність, прецизійність та робастність. Валідаційні характеристики визначено відповідно до вимог ICH Q2(R1) Validation of Analytical Procedures: Text and Methodology та Державної фармакопеї України [15].

Специфічність. Специфічність – здатність однозначно оцінювати аналізовану речовину при наявності інших компонентів (технологічні домішки, допоміжні речовини, продукти розкладу, і т.ін.), що можуть бути присутніми у зразку.

Для візуальної демонстрації здатності запропонованої методики селективно визначати цільову сполуку в складній матриці, були записані та проаналізовані абсорбційні спектри досліджуваних зразків. На рисунку 1 представлені отримані спектри, що дозволяють оцінити відсутність інтерференцій від потенційних домішок, продуктів розкладу та допоміжних речовин, тим самим підтверджуючи специфічність розробленої спектрофотометричної методики.

Детальний аналіз отриманих спектрів абсорбції, представлених на рисунку 1, підтверджує, що пік поглинання аналізованої речовини (при

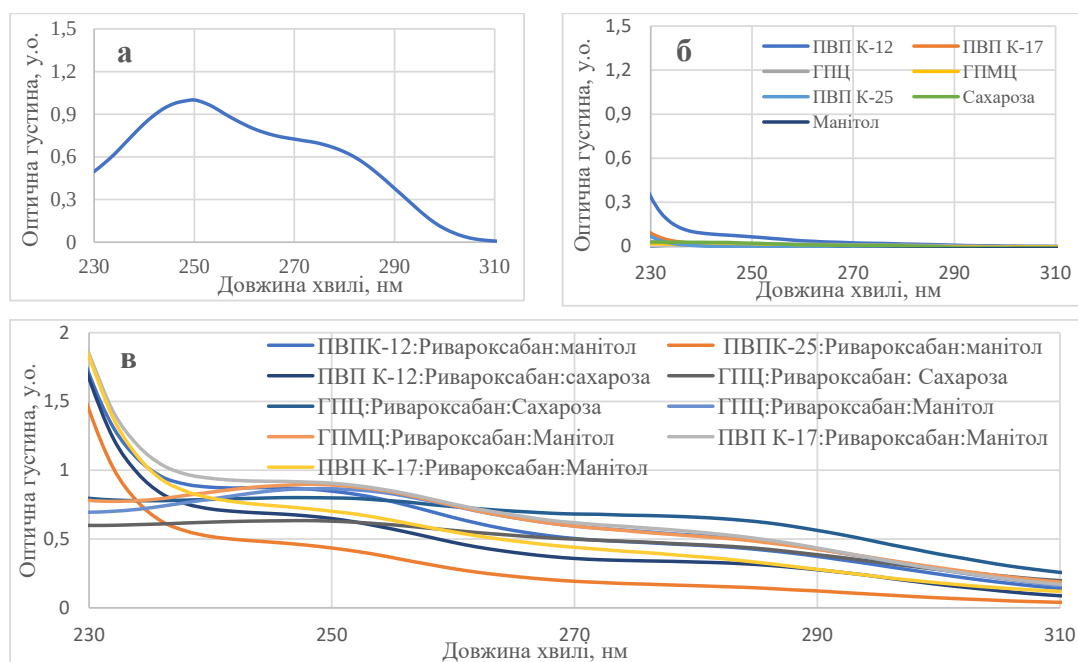


Рис. 1. Абсорбційні спектри досліджуваних зразків: а – АФІ ривароксабан, розчинений в суміші ацетонітрил : вода в пропорції 1:1; б – полімерні речовини, розчинені у воді; в – тверді дисперсні системи з АФІ ривароксабану, розчинені у воді

довжині хвилі 250 нм) є чітко вираженим і характеризується значною інтенсивністю. Найважливішим є те, що цей аналітичний пік не перебивається та не спотворюється спектрами інших компонентів, які можуть бути присутніми у зразку. Наприклад, полімерні речовини (які, як показано на рисунку 1б, мають мінімальне поглинання в цьому діапазоні). Це свідчить про високу селективність методики та відсутність значних матричних ефектів, що дозволяє однозначно ідентифікувати та кількісно визначати ривароксабан.

На основі проведених експериментів та візуальної оцінки спектрів, можна зробити такий висновок щодо специфічності методики: запропонована спектрофотометрична методика є специфічною, оскільки дозволяє точно та однозначно визначати ривароксабан при наявності додаткових компонентів суміші.

Лінійність. Лінійністю спектрофотометричної методики є її здатність (у межах встановленого діапазону застосування) забезпечувати результати вимірювань, що прямо пропорційні концентрації (або кількості) аналізованої речовини у зразку. Цей параметр є фундаментальним для кількісних методик, оскільки він гарантує, що зміна концентрації аналіту призводить до передбачуваної та пропо-

рційної зміни аналітичного сигналу, дозволяючи точно визначати концентрацію невідомих зразків.

У нашому випадку аналізованою речовиною є ривароксабан, що входить до складу відцентрово сформованої полімерної твердої дисперсної системи. Оскільки кінцева концентрація аналізованої речовини в розчині безпосередньо залежить від кількості розчиненої ТДС, варіація концентрацій для дослідження лінійності була реалізована шляхом точного розведення стандартного розчину ТДС у воді очищених.

Для перевірки можливого діапазону концентрацій, який охоплює як очікувані робочі рівні, так і можливі відхилення. Для цього було підготовлено серію розчинів з п'ятьма різними кількостями ривароксабану, що відповідають діапазону від 80% до 120% від номінальної концентрації аналіту (таблиця 1). Це дозволяє ретельно вивчити поведінку методики в усьому її передбачуваному робочому діапазоні.

Далі, для перевірки методики за параметром «Лінійність» було проведено серію вимірювань. Оптичну густину розчинів, що містять ТДС з різними концентраціями ривароксабану, вимірювали при довжині хвилі максимального поглинання (250 нм). Концентрації ривароксабану (г/л) ста-

Таблиця 1

Концентраційні рівні розчинів для дослідження лінійності методики кількісного визначення вмісту ривароксабану в полімерних ТДС

№	Концентрація ривароксабану, %	Об'єм води, мкл	Об'єм 0,1 г/л (за ривароксабаном) розчину ТДС, мкл	Концентрація, г/л
1	80	600	400	0,006
2	90	550	450	0,007
3	100	500	500	0,008
4	110	450	550	0,009
5	120	400	600	0,010

Таблиця 2

Результати дослідження за показником «Лінійність» методики кількісного визначення вмісту ривароксабану в полімерних ТДС

Показник	Концентрація ривароксабану, %				
	80,0	90,0	100,0	110,0	120,0
Оптична густина (у.о.), вимір 1	0,385	0,433	0,470	0,534	0,585
Оптична густина (у.о.), вимір 2	0,395	0,427	0,476	0,530	0,586
Оптична густина (у.о.), вимір 3	0,410	0,440	0,470	0,526	0,595
Середнє значення вимірів	0,397	0,433	0,472	0,530	0,589
Відхилення	0,013	0,007	0,003	0,004	0,006
Значення за рівнянням регресії	0,388	0,436	0,484	0,532	0,580
Стандартне відхилення	0,006	0,002	0,009	0,002	0,006
Стандартне відносне відхилення, %	1,579	0,443	1,772	0,292	1,024
Сума квадратів відхилень	0,000305				
Залишкове стандартне відхилення	0,010086				

новили: 0,006; 0,007; 0,008; 0,009; 0,010, що відповідає концентраційним рівням 80,0%; 90,0%; 100,0%; 110,0% та 120,0% від номінальної. Для кожного концентраційного рівня проводили по три паралельні виміри для забезпечення статистичної достовірності.

Лінійність методики, що валідується оцінювали з використанням регресійного аналізу методом найменших квадратів, що є загальноприйнятим підходом у валідації. Результати тестування за показником «Лінійність» наведено в таблиці 2.

Аналіз даних таблиці 2 показує, що отримані значення оптичної густини послідовно зростають зі збільшенням концентрації ривароксабану, що є першою ознакою лінійної залежності. Середні значення вимірів на кожному рівні показують чітку тенденцію до збільшення. Відносно низькі значення стандартних відхилень та відносних стандартних відхилень (менше 1,8% для всіх рівнів) свідчать про достатню прецизійність вимірювань у межах кожного концентраційного рівня. Незначні відхилення фактичних вимірюваних значень від результатів, прогнозованих за рівнянням регресії, вказують на близьку відповідність експериментальних даних теоретичній лінійній моделі, що є позитивним показником для подальшого аналізу. А сума квадратів відхилень та залишкове стандартне відхилення додатково підтверджують низьку дисперсію даних навколо регресійної прямої.

Для візуалізації лінійної залежності та підтвердження отриманих статистичних даних, було побудовано функцію рівня абсорбції від концентрації ривароксабану (рисунок 2). На основі цих даних також було розраховано коефіцієнт рівняння лінійної регресії та коефіцієнт кореляції.

Графік на рисунку 2 наочно підтверджує лінійний характер залежності між концентрацією ривароксабану та значеннями оптичної густини у всьому досліджуваному діапазоні від 80% до 120%. Експериментальні точки щільно групуються навколо регресійної прямої, демонструючи чітку позитивну кореляцію. Це візуальне підтвердження є важливим доказом правильності лінійної моделі для опису поведінки розробленої спектрофотометричної методики. Відсутність значних відхилень точок від лінії регресії додатково підтверджує стабільність вимірювань у всьому дослідженому діапазоні концентрацій.

На основі проведеного регресійного аналізу, візуалізації даних на графіку та їх статистичної оцінки, встановлено, що коефіцієнт кореляції (R^2) в інтервалі концентрацій ривароксабану від 80% до 120% становить 0,993. Це значення, відповідає загальноприйнятому пороговому значенню для аналітичних методик (не менше 0,990). Це переконливо свідчить про пряму лінійну залежність між концентрацією аналіту та відповідним значенням абсорбції. Таким чином, можна стверджувати, що запропонована спектрофотометрична методика є лінійною в усьому дослідженому діапазоні застосування та є придатною для кількісного визначення ривароксабану у складі твердих дисперсних систем.

Прецизійність. Прецизійність аналітичної методики визначає ступінь близькості результатів для декількох вимірів, проведених за відповідною методикою на різних пробах одного і того ж однорідного зразка. Вона може розглядатися на декількох рівнях:

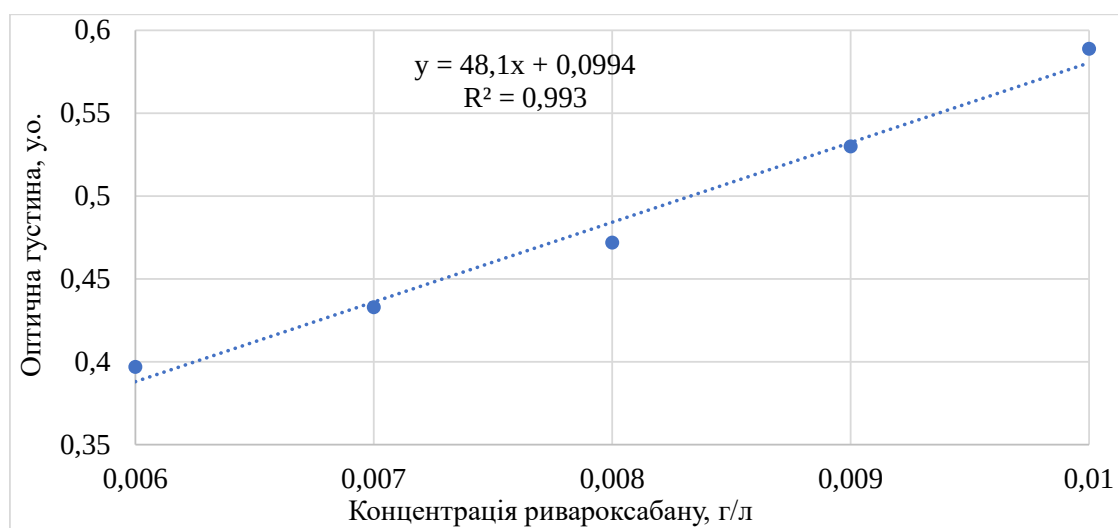


Рис. 2. Графік залежності оптичної густини ривароксабану від концентрації АФІ у складі твердих дисперсних систем

– збіжність (повторюваність) – це прецизійність методики при її застосуванні тим самим аналітиком за тих самих умов і протягом короткого відрізка часу;

– внутрішньолабораторна прецизійність – оцінює вплив внутрішньолабораторних змінних: різні дні, інші аналітики, інакше обладнання і т.п. зміни.

– відтворюваність – тобто міжлабораторна прецизійність.

Для валідації запропонованої методики було виконано дослідження на двох рівнях: збіжність та внутрішньолабораторна прецизійність. Ці два аспекти дозволяють оцінити як відтворюваність результатів за незмінних умов, так і вплив типових варіацій у межах однієї лабораторії. З цієї метою було виконано 9 повторних вимірів оптичної густини одного й того ж однорідного зразка (з концентрацією 0,005 г/л) двома різними аналітиками. Всі отримані дані були ретельно оброблені в програмному забезпеченні Microsoft Excel 2016 для розрахунку ключових статистичних параметрів: середнього значення, стандартного відхилення та довірчого інтервалу. Детальні результати випробування за показником «Прецизійність» представлено в таблиці 3.

Аналіз даних, представлених у таблиці 3, дозволяє зробити висновки щодо прецизійності запропонованої методики. Отримані значення відносного стандартного відхилення (менше 1,2%) та

довірчих інтервалів свідчать про високу ступінь збіжності результатів, отриманих одним аналітиком за однакових умов. Це підтверджує необхідну відтворюваність вимірювань.

Загальна відтворюваність методики, що враховує варіації між аналітиками (тобто внутрішньолабораторну прецизійність), оцінюється за довірчим інтервалом відтворюваності (Δz , %), який становить 0,484%. Це інтегральний показник, який враховує розбіжності між результатами, отриманими різними аналітиками. Низьке значення довірчого інтервалу відтворюваності вказує на те, що результати, отримані різними аналітиками в одній лабораторії, є достатньо близькими.

Таким чином, отримані дані переконливо демонструють, що розроблена спектрофотометрична методика відповідає вимогам до прецизійності. Значення стандартних відхилень та довірчих інтервалів знаходяться в прийнятних межах, що підтверджує високу повторюваність та відтворюваність результатів вимірювань за даною методикою.

Робасність. Робасність аналітичної методики – показник здатності методики не підпадати під вплив незначних, але контрольованих змін в умовах виконання методики, а також надійності методики в нормальних умовах її застосування. Для валідації даної методики за показником «Робасність» було виконано дослідження впливу зміни довжини хвилі на отримані результати. Щоб визначити вплив цих невеликих варіацій на оптичну густину, вимірювання проводилися тричі для кожної з трьох довжин хвиль: 248 нм, 250 нм та 252 нм. Отримані результати, що включають індивідуальні виміри, середні значення та значення відхилень, детально представлено в таблиці 4.

Незважаючи на незначні зміни довжини хвилі (± 2 нм від 250 нм, що є оптимальною для ривароксабану), отримані значення оптичної густини залишаються близькими, а відносні стандартні відхилення для всіх досліджених довжин хвиль не перевищують 1% (найбільше 0,525% для 252 нм). Це свідчить про високу стійкість методики до флуктуацій у параметрі довжини хвилі детектора. Таким чином, результати випробування підтверджують, що спектрофотометрична методика є надійною в межах досліджених варіацій довжини хвилі та відповідно рутинному виконанні.

На основі всебічного дослідження, проведеного згідно з міжнародними настановами з валідації аналітичних методик, було отримано сукупність даних, що підтверджують ефективність та надійність розробленої спектрофотометричної

Таблиця 3

Результати тестування за показником «Прецизійність» методики кількісного визначення вмісту ривароксабану в полімерних ТДС

Параметр	Аналітик 1	Аналітик 2
1 (C=0,005 г/л)	0,288	0,288
2 (C=0,005 г/л)	0,287	0,280
3 (C=0,005 г/л)	0,287	0,286
4 (C=0,005 г/л)	0,285	0,287
5 (C=0,005 г/л)	0,289	0,283
6 (C=0,005 г/л)	0,288	0,290
7 (C=0,005 г/л)	0,287	0,287
8 (C=0,005 г/л)	0,289	0,286
9 (C=0,005 г/л)	0,283	0,281
Середнє значення, Z	0,287	0,285
Стандартне відхилення, S_z	0,002	0,003
Стандартне відхилення, S_z , %	0,675	1,162
Збіжність, довірчий інтервал, Δ_z , %	0,519	0,893
Відтворюваність, довірчий інтервал, Δ_z , %	0,484	

Таблиця 4

Результати випробування за параметром «Робасність» методики кількісного визначення вмісту ривароксабану в полімерних ТДС

Довжина хвилі, нм	Вимір 1	Вимір 2	Вимір 3	Середнє значення	Стандартне відхилення	Стандартне відхилення, %
248	0,970	0,971	0,972	0,971	0,001	0,103
250	0,981	0,980	0,981	0,981	0,001	0,059
252	0,960	0,954	0,964	0,959	0,005	0,525
Підсумок трьох вимірювань				0,970	0,011	1,101

Таблиця 5

Підсумкові результати проведеної валідації спектрофотометричної методики для кількісного визначення ривароксабану у полімерних ТДС

Параметр	Критерій прийнятності	Результат
Специфічність	Спектри поглинання ривароксабану та інших компонентів не повинні перекриватися	Відповідає
Лінійність	Коефіцієнт кореляції (R^2) $\geq 0,990$	0,993
Прецизійність	Збіжність. Довірчий інтервал: $\leq 1,6\%$	Аналітик 1: 0,519 Аналітик 2: 0,893
	Відтворюваність. Довірчий інтервал: $\leq 1,0\%$	0,484
Робасність	Відносне стандартне відхилення $\leq 2,0\%$	1,101

методики. Відповідно до одержаних результатів валідації підтверджено, що досліджувана методика дозволяє отримувати правильні та відтворювані значення кількісних вимірювань ривароксабану у полімерних композиціях твердих дисперсних систем. Загальні результати валідації запропонованої методики наведено в таблиці 5.

Висновки. Проведене дослідження дозволило успішно розробити та всебічно валідувати спектрофотометричну методику кількісного визначення ривароксабану у полімерних твердих дисперсних системах. Комплексна оцінка таких критичних параметрів, як специфічність, лінійність, прецизійність та робасність, підтвердила повну відповідність методики встановленим критеріям прийнятності. Це свідчить про високу якість, надійність та придатність даної методики для рутинного контролю якості в умовах можливого фармацевтичного виробництва та лабораторної практики.

Успішна валідація цієї методики відкриває перспективи для подальшої розробки та вдоскона-

лення твердих дисперсних систем ривароксабану. Зокрема, вона створює надійний аналітичний інструмент для моніторингу та оцінки ефективності нових ТДС, що синтезуються з метою підвищення розчинності ривароксабану – активної фармацевтичної субстанції, яка характеризується низькою розчинністю у воді.

Ця валідована методика дозволить точно визначати вміст ривароксабану в нових композиціях, що має вирішальне значення для кількісної оцінки впливу різних полімерних матриць та технологічних параметрів на ступінь інкапсуляції та, як наслідок, на підвищення розчинності АФІ. Майбутні дослідження будуть сфокусовані на застосуванні цієї методики для скринінгу та відбору оптимальних варіантів ТДС, контролю однорідності розподілу діючої речовини, а також для вивчення кінетики вивільнення та розчинності ривароксабану з розроблених систем, що є ключовим кроком до створення препаратів з покращеною біодоступністю.

Список літератури:

- Solomon C., Niță D.T., Ozon E.A. et al. An overview of the pharmaceutical profile of rivaroxaban. *Farmacia*. 2025. Vol. 73. № 1. DOI: 10.31925/farmacia.2025.1.1.
- Kozanlı M., Can N.Ö. Quantitative determination of rivaroxaban in pharmaceutical formulations by ultra performance liquid chromatography. *European Journal of Life Sciences*. 2024. Vol. 3, № 3. P. 93–100. DOI: 10.55971/EJLS.1535613.
- Deokar A.U., Siddheshwar S., Kakad S.B. Analytical method development and validation of rivaroxaban-A review. *Research Journal of Science and Technology*. 2020. Vol. 12, № 1. P. 36–46. DOI: 10.5958/2349-2988.2020.00004.2.
- Ozon E.A., Mati E., Karamelas O. et al. The development of an innovative method to improve the dissolution performance of rivaroxaban. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. № 12. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33162.

5. Kumar R., Singh A., Salwan R. et al. An informative review on solid dispersion. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*. 2023. Vol. 23. P. 114–121. DOI: 10.30574/gscbps.2023.22.1.0498.
6. Choi M.J., Woo M.R., Choi H.G. et al. Effects of polymers on the drug solubility and dissolution enhancement of poorly water-soluble rivaroxaban. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23. № 16. DOI: 10.3390/ijms23169491.
7. Reçber T., Haznedaroğlu İ.C., Çelebier M. Review on characteristics and analytical methods of rivaroxaban. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2022. Vol. 52. № 4. P. 865–877. DOI: 10.1080/10408347.2020.1839735.
8. Azhakesan A., Pasupuletti K.K., Pentu N.A. Critical review of analytical methods for quantification of rivaroxaban in biological samples and pharmaceutical formulations. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*. 2025. Vol. 15. № 2. P. 067–085. DOI: 10.7324/JAPS.2025.210368.
9. Bosák J., Šíma M., Krejčí T. et al. Development of immediate-release formulation with reliable absorption of rivaroxaban in various meal regimes. *Clinical and Translational Science*. 2024. Vol. 17. № 5. DOI: 10.1111/cts.13820.
10. Cini N., Gölcü A. Spectrophotometric methodologies applied for determination of pharmaceuticals. *Current Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 17. № 8. P. 1141–1168. DOI: 10.2174/1573411016999200526133357.
11. Çelebier M., Kaynak M., Altınöz S. et al. UV spectrophotometric method for determination of the dissolution profile of rivaroxaban. *Dissolution Technologies*. 2014. Vol. 21. № 4. DOI: 10.14227/DT210414P56.
12. Kapourani A., Eleftheriadou K., Kontogiannopoulos K.N. et al. Evaluation of rivaroxaban amorphous solid dispersions physical stability via molecular mobility studies and molecular simulations. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021. Vol. 157. Article ID: 105642. DOI: 10.1016/j.ejps.2020.105642.
13. Mandake G.R., Patil I.S., Patil O.A. et al. UV spectroscopy analysis and degradation study of rivaroxaban. *Asian Journal of Research in Pharmaceutical Science*. 2018. Vol. 8. № 2. P. 57–60. DOI: 10.5958/2231-5659.2018.00012.7.
14. Seshamamba B.S., Sekaran C.B. Spectrophotometric analysis for the quantification of rivaroxaban in bulk and tablet dosage form. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 2017. Vol. 10. DOI: 10.15761/GDT.1000122.
15. ДП «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів». Валідація аналітичних методик і випробувань. *Державна фармакопея України*. 2015. Т. 2. С. 910–929.

Fedorenko V.V., Behdai A.O., Yaremenko V.V., Goy A.M., Ishchenko O.V., Bessarabov V.I.
DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A SPECTROPHOTOMETRIC METHOD FOR
DETERMINING THE QUANTITATIVE CONTENT OF RIVAROXABAN IN SOLID DISPERSION
SYSTEMS

A significant number of modern active pharmaceutical ingredients (APIs), including rivaroxaban, are characterised by low solubility, which limits their bioavailability and therapeutic efficacy. It is known that the inclusion of APIs in polymeric solid dispersion systems (SDS) is one of the promising approaches to increasing solubility. The effective development and quality control of such innovative forms requires the creation of reliable and validated analytical methods. Therefore, the aim of this study was to develop and validate a simple, accurate, specific and robust spectrophotometric method for the quantitative determination of rivaroxaban in polymeric SDS to provide a reliable analytical tool for quality control. Solid dispersion systems of rivaroxaban were prepared with various pharmaceutically acceptable polymer carriers, and the quantitative determination of rivaroxaban was performed using the UV spectrophotometric method of analysis. The developed method was validated in accordance with the requirements of ICH Q2(R1) for parameters such as specificity, linearity, precision (convergence, reproducibility) and robustness, using standard statistical approaches for data analysis. The results confirmed the high specificity of the method, since the maxima of the rivaroxaban spectra did not overlap with the maxima of the SDS component spectra. Linearity was demonstrated in the concentration range of 80–120% of the nominal value, with a correlation coefficient of $R^2 = 0.993$. The method also showed high precision, with confidence interval values for convergence and reproducibility within the established criteria (<1.0%). In addition, robustness studies revealed the stability of the method to minor changes in the detector wavelength, as confirmed by a low relative standard deviation (1.101%). Thus, the developed spectrophotometric method for the quantitative determination of rivaroxaban in polymeric solid dispersion systems is validated and fully complies with the requirements for analytical methods. It is a reliable tool for quality control and has significant potential for use in the further development and optimisation of new rivaroxaban SDSs, contributing to the quantitative assessment of the effect of polymer matrices on increasing its solubility.

Key words: rivaroxaban, solid dispersion systems, validation, active pharmaceutical ingredient, spectrophotometry, quantitative determination, analytical method.

Дата надходження статті: 29.09.2025

Дата прийняття статті: 16.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Христич О.В.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Корогодська А.М.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕХАНІЗМУ ФАЗОУТВОРЕННЯ ЦЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ СПОЛУК СИСТЕМИ $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$

У роботі наведено результати комплексного дослідження процесів фазоутворення в системі $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CoO}-\text{NiO}$, яка лежить в основі створення шпінельних глиноземистих цементів спеціального призначення. Як сировину використано відходи хімічної промисловості – шлам водоочищення та відпрацьований каталізатор, що забезпечує ресурсо- та енергозберігаючий характер розробленої технології. Для вивчення кінетики процесів застосовано методіку ізотермічного випалу зразків у діапазоні температур 900–1300 °С з подальшим аналізом ступеня перетворення, швидкості реакцій та енергії активації. Встановлено, що реакції між оксидами кальцію, алюмінію, кобальту та нікелю розпочинаються з помітною швидкістю при 900 °С і повністю завершуються при 1300 °С, утворюючи суміш гідралічно активних моно- та діалюмінатів кальцію поряд із вогнетривкими шпінелями CoAl_2O_4 та NiAl_2O_4 . Показано, що процес фазоутворення описується рівняннями Гінстлінга–Броунштейна та Арреніуса, що вказує на переважно дифузійний механізм взаємодії. Рентгенофазовий аналіз підтвердив послідовність формування основних фаз у процесі термообробки, а також те, що при взаємодії вихідних сировинних компонентів суміші у матеріалі синтезується гідралічно активні моно- та діалюмінату кальцію та вогнетривкі кобальтова та нікелева шпінелі. Виявлено узгодженість між розрахунковим та фактичним фазовим складом, що підтверджує можливість цілеспрямованого регулювання властивостей цементів. Синтезовані композиції характеризуються високою міцністю, прискореним твердінням та стійкістю до високих температур, що робить їх перспективними для використання у теплонапружених вузлах високотемпературних агрегатів.

Ключові слова: шпінельвмісні глиноземисті цементи, фазоутворення, кінетика реакцій, твердофазний синтез, відходи хімічної промисловості.

Постановка проблеми. Загальновідомо, що експлуатаційні властивості матеріалів пов'язані з їх складом та структурою. Наприклад, в виробництві цементу після випалу сировинної суміші на максимальну температуру 1400-1450 °С утворюється механічно міцний матеріал – клінкер, що також складається із кристалічної та аморфної фаз [1, 2]. При цьому в залежності від властивостей сировини, складу суміші та технології виготовлення кристалічна фаза містить кальцеві та алюмокальцеві силікати. Авторами [3–5] показано, що технологічний процес виробництва в'язучих матеріалів є за своєю суттю процесом формування та послідовних перетворень їх структури. Отже, для ефективного регулювання властивостей та підвищення якості цементних матеріа-

лів і виробів слід комплексно розглядати процеси структуроутворення мас і виробів та технології виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для створення перспективних ресурсо- і енергозберігаючих технологій авторами проведено дослідження кальційалюмовмісні, кобальт- та нікельвмісні відходів різних галузей промисловості та встановлено, що за своїм хімічним складом відходи водоочищення і відпрацьованого каталізатору хімічних реакцій можуть бути використані як вихідні сировинні матеріали для виробництва спеціальних шпінельних глиноземистих цементів [6, 7].

Авторами [8] відзначено, що утворення гідралюмінатів із різною реакційною активністю під час твердіння зумовлює високу міцність і довго-

вічність цементного каменю. Кобальтовий алюмінат підвищує термостійкість та електрохімічну стабільність, а нікелева шпінель забезпечує виняткову твердість і стійкість до зношування. Обидві шпінелі також надають матеріалам додаткових функціональних властивостей – магнітних та електропровідних, що відкриває перспективи їх застосування в енергетичних технологіях.

У зв'язку з цією інформацією, представляє теоретичний та практичний інтерес дослідження процесів мінералоутворення в сировинних сумішах, які містять відходи виробництва узятих в строго заданому стехіометричному співвідношенні.

Мета роботи – комплексне дослідження механізму процесів фазоутворення в системі $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CoO}-\text{NiO}$, для створення на її основі вогнетривких цементів спеціального призначення за ресурсозберігаючою технологією.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження процесів фазоутворення в системі $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CoO}-\text{NiO}$ при створенні ресурсозберігаючої технології модифікованих глиноземистих цементів виготовлена сировинна суміш, в якості вихідних матеріалів використовувалися відходи водоочищення та відпрацьованого каталізатору ГПС-4Ш ПАТ “Азот” (м.Черкаси), хімічний склад яких представлений в табл. 1.

Сировинні матеріали бралися з розрахунку отримання клінкеру строго заданого фазового складу. Помел приготовленої сировинної суміші здійснювався в кульовому порцеляновому млині у вигляді шламу ($W = 50\%$) до повного проходження через сито №006. З сировинної суміші формувалися зразки-циліндри діаметром 15 мм на гідравлічному пресі типу П-125 при питомому тиску пресування 60–80 МПа. Випал зразків здійснювався в лабораторній криптоловій печі в температурному інтервалі 900–1300 °С з ізотермічною витримкою 15, 30, 60 і 180 хв. В отриманих зразках визначався вільний оксид кальцію етил-

гліцератним методом [9]. Вміст вільного оксиду кальцію в випаленому зразку свідчить про те, що синтез ще не завершений.

Результати досліджень представлені в табл. 2.

Змінними факторами експерименту є температура та ізотермічна витримка при відповідній температурі.

Ступінь перетворення речовини розраховувалася за формулою:

$$G = \frac{\text{CaO}_{\text{заг.}} - \text{CaO}_{\text{вільн.}}}{\text{CaO}_{\text{заг.}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

Залежність ступеня перетворення речовини від часу представлена на рис. 1.

Симбатно змінюється і швидкість взаємодії CaO з іншими компонентами сировинної шихти, розрахована за рівнянням Гінстлінга-Броунштейн [10]:

$$I = 1 - \frac{2}{3}G - (1 - G)^{2/3}, \quad (2)$$

де I – швидкість реакції; G – ступінь перетворення реагентів.

Результати розрахунків представлені в табл. 2.

Графічна залежність $I = f(\tau)$ для кожної температури представлена на рис. 2.

На підставі проведених досліджень визначено константу швидкості реакції мінералоутворення для кожної температури.

Константа швидкості реакції відповідно до закону Больцмана виражається рівнянням Арреніуса:

$$K = A \cdot e^{-Q/RT} \quad (3)$$

де A – передекспоненційний множник; R – універсальна газова стала ($R = 8,314 \cdot 10^3$ Дж/(моль)); T – температура, К; Q – енергія активації, кДж/моль.

Числове значення константи швидкості реакції відповідає тангенсу кута нахилу прямої до осі абсцис (рис. 3). Результати розрахунків наведені в табл. 2.

Рівняння (3) в логарифмічному виразі представлено формулою:

$$\ln K = \ln A \cdot e^{-Q/RT} \quad (4)$$

Таблиця 1

Хімічний склад вихідних сировинних матеріалів

Назва сировини	Кількість основних оксидів, мас. %								
	CaO	CoO	MoO ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	R ₂ O	SiO ₂	п.п.п.
Вуглекислий кальцій технічний	55,00	–	–	–	0,50	0,01	–	–	44,49
Кобальт (II) гідроксид карбонат	–	55,0	–	–	–	–	–	–	45,0
Технічний глинозем	–	–	–	98,46	–	0,05	0,43	0,06	1,00
Носій каталізатора ГПС-4Ш	–	2,55	10,7	86,75	–	–	–	–	–
Відходи водоочищення	43,84	–	–	–	7,70	1,69	1,22	2,30	43,25

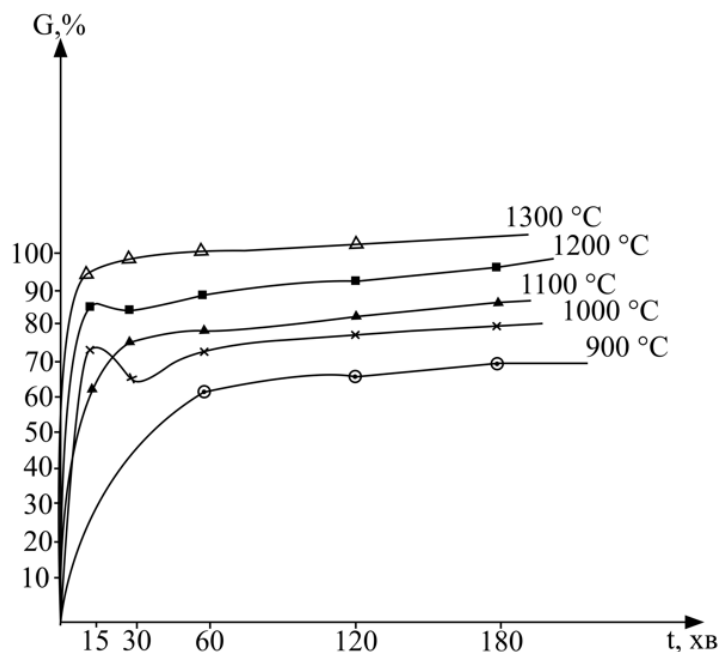


Рис. 1. Залежність ступеня перетворення від температури і часу витримки для клінкеру шпінельного глиноземистого цементу

Таблиця 2

Результати дослідження фазоутворення клінкерів шпінельних глиноземистих цементів

Температура синтезу, °C	Витримка, т, хв.	СаО _{вільн.} мас. %	Ступінь перетворення, G, %	Швидкість реакції, І	tg α · 10 ⁴	lg K
900°C	15	1,08	92,39	0,203	0,267	-4,5735
	30	4,84	65,90	0,072		
	60	5,38	62,09	0,069		
	120	5,02	64,63	0,069		
	180	4,65	67,24	0,076		
1000°C	15	3,73	73,72	0,098	1,388	-3,8576
	30	4,89	65,54	0,071		
	60	3,42	75,90	0,106		
	120	3,18	77,59	0,113		
	180	2,94	79,28	0,121		
1100°C	15	5,37	62,16	0,062	5,606	-3,2513
	30	3,22	77,31	0,140		
	60	2,89	79,64	0,122		
	120	2,46	82,67	0,137		
	180	2,02	85,77	0,155		
1200°C	15	1,77	87,53	0,166	2,638	-3,5787
	30	2,09	85,27	0,152		
	60	1,49	89,50	0,179		
	120	1,24	91,26	0,193		
	180	0,98	93,09	0,209		
1300°C	15	0,74	94,78	0,227	22,930	-2,6396
	30	0,42	97,04	0,255		
	60	сліди	100	0,333		
	120	сліди	100	0,333		
	180	немає	100	0,333		

або
$$\lg K = b - \frac{a}{T} \quad (5)$$

де
$$a = \frac{Q}{2,303 \cdot R} \quad (6)$$

$$b = \lg A \quad (7)$$

Можемо розрахувати енергію активації:

$$Q = a \cdot 4,575 \quad (8)$$

Величина a – знаходиться з графіка залежності (T) і числено дорівнює тангенсу кута нахилу прямої до осі абсцис; b – дорівнює числовому значенню відрізка, який відсікається прямою на осі ординат ($\lg K$).

Результати розрахунків представлені на рис. 3.

З графіка знаходимо тангенсу кута нахилу прямої до осі абсцис та величину A :

$$\operatorname{tg} \alpha = 8,92 \quad (9)$$

$$A = 10^b = 10^{0.8} = 6,309 \quad (10)$$

Маючи всі необхідні дані, обчислено значення енергії активації:

$$Q = 1,9339 \cdot 4,575 = 8,84759 \text{ ккал/моль} \quad (11)$$

$$Q = 37,0183 \text{ кДж/моль} \quad (12)$$

Отже, константа швидкості реакції фазоутворення виражається формулою:

$$K = 6,309 \cdot e^{-37,0183/RT}, \quad (13)$$

Результати експериментальних досліджень твердофазних процесів, що відбуваються в сировинній суміші, яка містить відходи хімічної промисловості, в інтервалі температур 900–1300 °С показують, що взаємодія оксидів кальцію з оксидом алюмінію та кобальту з помітною швидкістю починають протікати вже при 900 °С і закінчується при 1300 °С.

Встановлено, що для всіх значень температур залежність $I = f(t)$ є лінійною, що свідчить про перевагу дифузійного характеру взаємодії оксидів. Прямі лінії не виходять з початкової точки координат, а відсікають на осі ординат відрізки, це свідчить про те, що в початковий період протікання процесу швидкість лімітується хімічною взаємодією компонентів сировинної суміші на межі розділу фаз і тільки після утворення безперервного шару продуктів твердофазних реакцій швидкість процесу визначається дифузійним характером [10]. Процеси фазоутворення в клінкері розробленого глиноземистого цементу відбуваються за рахунок реакцій у твердій фазі, швидкість яких описується рівнянням Гінстлінга-Броунштейна [9].

З метою підтвердження проведених раніше кінетичних досліджень плавності засвоєння оксиду кальцію і утворення тих чи інших бінарних сполук при зазначених температурах і ізотермічних витримках, проведений рентгенографічний аналіз

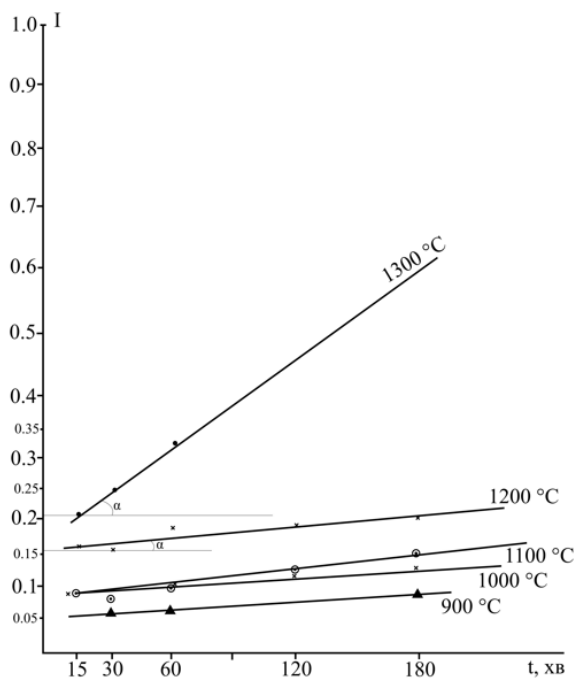


Рис. 2. Залежність швидкості реакції від температури і часу витримки

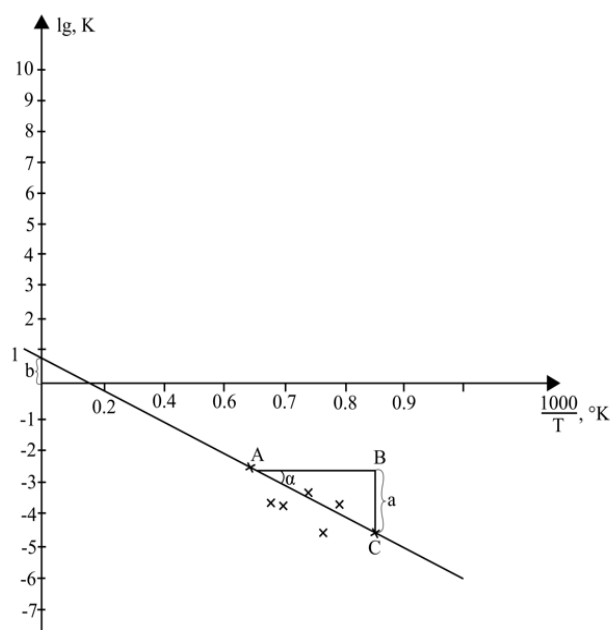


Рис. 3. Залежність $\lg K$ від температури

випалених зразків [11, 12]. Спочатку, (при 900 °C) на рентгенограмах чітко ідентифікуються дифракційні максимуми з міжплощинними відстанями, які можна віднести до вихідних сировинних матеріалів: CaCO_3 , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, а також продукту розкладання кальциту – CaO . Разом з тим на рентгенограмі ідентифікуються піки, які відносяться до Co_3O_4 , який починає утворюватися внаслідок розкладання кобальтвмісної складової відпрацьованого каталізатору. При ізотермічній витримці 120 хв при 900 °C починає утворюватися CaAl_2O_4 . При збільшенні часу витримки до 180 хв спостерігається зменшення інтенсивностей дифракційних максимумів, характерних для CaCO_3 .

На рентгенограмах зразків при 1000 °C спостерігається зменшення інтенсивності дифракційних максимумів, характерних для вихідних компонентів CaCO_3 , присутні піки $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, CaO і $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який відповідає частковій гідратації CaO вологою повітря. А також зростає інтенсивність дифракційних максимумів, характерних для утворення сполуки CaAl_2O_4 . При витримці 30 хв. зникає Co_3O_4 і починають з'являтися піки, відповідні дифракційним максимумам, характерних для CoO , а також з'являються піки CoAl_2O_4 . При цьому інтенсивність піків, що характеризують дану сполуку із збільшенням часу витримки зростає. Зі збільшенням часу витримки до 120 хв починають з'являтися піки, характерні для NiAl_2O_4 .

На рентгенограмах зразків, випалених при температурі 1100 °C присутні піки, що відповідають дифракційним максимумам, характерним для корунду, який утворився з глинозему $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, а також продукту розкладання кальциту CaO і супутнього йому $\text{Ca}(\text{OH})_2$. При ізотермічній витримці 60 хв. зникають піки, що відповідають дифракційним максимумам, характерних для CoO . При зазначеній температурі спостерігається кількісне збільшення дифракційних максимумів бінарної сполуки CaAl_2O_4 ; CoAl_2O_4 та NiAl_2O_4 . Рентгенограма зразків, випалених при температурі 1100 °C протягом 3 годин показує наявність в суміші всіх перерахованих вище компонентів.

На рентгенограмах складів, випалених при 1200 °C з різною ізотермічною витримкою, чітко ідентифікуються зміни фазового складу, що характерно для даної температури. Значно зростають піки, характерні для CaAl_2O_4 ; CoAl_2O_4 та NiAl_2O_4 . Фіксуються піки, що відповідають $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і вільному CaO , які зменшуються зі збільшенням часу витримки. З'являються піки, що характеризують сполуку CaAl_4O_7 . Із збільшенням ізотермічної витримки до 3 годин спостерігається значне збільшення інтенсивності ліній, характерних для утворення сполук CaAl_2O_4 , CaAl_4O_7 , NiAl_2O_4 .

При збільшенні температури до 1300 °C піки, що відповідають $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і CaO зменшуються до мінімуму, а при витримці 3 години повністю зникають. Піки, що характеризують синтезовані фази CaAl_2O_4 , CaAl_4O_7 ; CoAl_2O_4 та NiAl_2O_4 збільшуються, що підтверджує попередні дослідження [13].

Висновки. Таким чином, в результаті проведених кінетичних досліджень встановлено, що процеси фазоутворення в сировинній суміші, що складається з карбонатів кальцію, оксидів алюмінію, кобальту та нікелю, які містять у складі відходів хімічної галузі промисловості (у вигляді шламу водоочищення та відбракованого носія каталізатора), починають протікати з помітною швидкістю вище 900 °C і повністю завершуються при температурі 1300 °C. В результаті взаємодії вихідних сировинних компонентів суміші у матеріалі синтезується суміш гідралічно активних моно- та діалюмінату кальцію та вогнетривкої кобальтової та нікелевої шпінелі, що забезпечує одержуванню в'язучим матеріалам комплекс заданих експлуатаційних характеристик: високу міцність, прискорені терміни тверднення, вогнетривкість.

Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що розрахунковий фазовий склад клінкерів відповідає реальним складам. Це дає можливість синтезувати шпінельні глиноземисті цементи на основі композицій досліджуваної системи із заданими властивостями.

Список літератури:

1. Рунова Р.Ф. В'язучі речовини / Р.Ф. Рунова, Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, Ю.Л. Носовський. Київ : Основа, 2012. 446 с.
2. Дорогань Н.О., Свідерський В.А., Черняк Л.П. Білий портландцемент. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, вид-во «Політехніка», 2018. 204 с.
3. Dorogan N.A. Fertigungstechnologie des weißen Zements – Aspekte der Strukturierung. *Eurorean applied sciences, ORT Publishing – Stuttgart, Germany*. 2013. № 10-2. p. 8–13.
4. Черняк Л.П. Особливості структуроутворення дисперсних систем у технології портландцементу. Технологічний аудит і резерви виробництва, вип. 6, № 5, 2013, стор. 8–10. doi: 10.15587/2312-8372.2013.19654

5. Черняк Л.П., Свідерський В.А., Дорогань Н.О. Питання стуктурутворення дисперсних систем у технології портландцементу. Стратегія якості в промисловості та освіті : матеріали Х Міжнар. конф. Варна–Дніпропетровськ, 2014. С. 185–192.
6. Khrystych O., Shabanova N., Korohodskaya A., Gamova O. Resource and energy saving technology of special-purpose cements. *ce/papers*. 2023. Vol. 6. P. 1589–1593. DOI: <https://doi.org/10.1002/cepa.2980>
7. Ворожбіян Р.М., Шабанова Г.М., Корогодська А.М. Порівняльні характеристики глиноземистих цементів з використанням відходів хімічних підприємств. Збірник наукових праць ПАТ «УкрНДІВогнетривів ім. А.С. Бережного». 2013. № 113. С. 86–93.
8. Христич О.В., Кустов М.В., Нестерук Т.Р. Відходи – джерело додаткових ресурсів при отриманні будівельних матеріалів. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : зб. наук. статей XVIII Міжнар. наук.практ. конф. Харків : УкрНДІУП, 2022. С. 297–299.
9. Шабанова Г.М., Корогодська А.М., Христич О.В. В'яжучі матеріали: практикум. Харків : НТУ «ХПІ», 2014. 220 с.
10. Свідерський В.А., Черняк Л.П., Пахомова В.М., Дорогань Н.О. Методи досліджень і контролю технології силікатних виробництв : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, вид-во «Політехніка», 2021. 109 с.
11. Chukanov N. V., Vigasina M. F. *Vibrational (Infrared and Raman) Spectra of Minerals and Related Compounds*. Cham: Springer, 2020. 1376 p. (Springer Mineralogy). DOI: 10.1007/978-3-030-26803-9.
12. Klopogge J. T. *Handbook of Mineral Spectroscopy*. Amsterdam: Elsevier, 2018. 930 p.
13. Khrystych O.V., Shabanova G. N., Korogodskaya A. N., Logvinkov S.M, Mykhailova E.A. Physico-chemical basics of creating alumina cements based on nickel and cobalt spinel. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2024. No. 5. P. 262–271. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-156-5-91-95>

Khrystych O.V., Korogodskaya A.M. STUDY OF THE SPECIFIC ASPECTS OF THE PHASE FORMATION MECHANISM OF CEMENTS

BASED ON $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ SYSTEM COMPOSITION

The paper presents the results of a comprehensive study of phase formation processes in the $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CoO}-\text{NiO}$ system, which underpins the development of spinel-containing alumina cements for special applications. Industrial by-products, namely water treatment sludge and spent GPS-4Sh catalyst, were used as raw materials, thus ensuring the resource- and energy-saving character of the proposed technology. To investigate the kinetics of phase formation, isothermal firing of samples was carried out within the 900–1300 °C temperature range, followed by determination of conversion degree, reaction rate, and activation energy. It was established that interactions between calcium, aluminum, cobalt, and nickel oxides start noticeably at 900 °C and are completed at 1300 °C, yielding a mixture of hydraulically active calcium mono- and dialuminates along with refractory CoAl_2O_4 and NiAl_2O_4 spinels. The phase formation process was shown to follow the Ginstling–Brounshtein and Arrhenius equations, indicating a diffusion-controlled reaction mechanism. The X-ray phase analysis confirmed the sequence of the main phases forming during heat treatment, as well as the fact that when the initial raw components of the mixture interact, hydraulically active calcium mono- and di-aluminates and refractory cobalt and nickel spinels are synthesized in the material. A strong correlation between the calculated and experimental phase compositions was revealed, confirming the feasibility of targeted regulation of cement properties. The synthesized compositions are characterized by high strength, accelerated hardening, and resistance to high temperatures, which makes them promising for use in heat-stressed components of high-temperature units.

Key words: spinel-containing alumina cements, phase formation, reaction kinetics, solid-state synthesis, chemical industry waste.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 12.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 641.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/35>

Фролова Н.Е.

Національний університет харчових технологій

Борисова Е.О.

Національний університет харчових технологій

Самойленко П.О.

Національний університет харчових технологій

Гмиря О.О.

Національний університет харчових технологій

АЮРВЕДИЧНІ СТРАВИ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОГО МЕНЮ СУЧАСНОГО РЕСТОРАННОГО ЗАКЛАДУ

У статті розглянуто сучасні розробки аюрведичних страв для інноваційного меню сучасного ресторанного закладу. Базуючись на положеннях аюрведичного харчування, магістрами професійно-освітньої програми «Технологія дієтичних та аюрведичних харчових продуктів» Національного університету харчових технологій розроблено асортимент аюрведичних страв для приведення до стану рівноваги найбільш вразливу психофізіологічну конституцію людського організму Вата Доша. Використано рекомендації Аюрведи щодо вибору та поєднання продуктів для Вата-доші, таблиці сумісності рослинної сировини, збірники страв аюрведичної кулінарії.

Розроблено рецептуру солодкої запіканки для врівноваження Вата Доші з використанням фініків, як природного заміника цукру. Використано композицію прянощів – корицю, кардамон, сушений імбир та мускатний горіх.

Як альтернативу традиційним пшеничним інгредієнтам класичної рецептури використано рисове борошно, що дозволяє вживати продукт особам із глютенною непереносимістю.

Для спеціалізованого харчування людей Вата-конституції розроблена рецептура аюрведичної холодної закуски з йогурту, а саме дахді з додаванням нетрадиційної рослинної сировини – асафетида та каррі із забезпеченням високої харчової цінності розробленого виробу.

Розроблено інноваційний аюрведичний продукт – овочевий паштет на основі баклажанів для страви «Бабагануш». Цей продукт з використанням суміші горіхів та композиції прянощів із зігрівальними та зволожувальними властивостями (імбир, кумин, асафетида) спрямований на підтримання рівноваги Вата Доші. Встановлено оптимальне співвідношення компонентів у рецептурі овочевих паштетів, що забезпечує збалансування «холодного» та «сухого» ефекту овочевих страв на організм людини.

Наведені розробки пропонують сучасну модель рецептурного рішення з впровадженням у меню закладів зі вегетаріанським та аюрведичним харчуванням, розширюючи асортимент страв для людей конституції Вата доша та для різних категорій споживачів. Такі страви можуть стати конкурентною перевагою для підприємств, які прагнуть відповідати сучасним тенденціям здорового харчування.

Ключові слова: Аюрведа, конституція Вата Доша, харчування, інноваційні страви.

Постановка проблеми. У розвинутих країнах світу без дефіциту продовольства, різноманітних БАР в продуктах харчування, дотриманням сучасних норм фізіологічних потреб в харчових

речовинах спостерігається поширення хвороб, що знижує рівень щасливого існування.

Поряд з цим в Україні зростає інтерес до альтернативних підходів до організації здорового харчу-

© Фролова Н.Е., Борисова Е.О., Самойленко П.О., Гмиря О.О., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

вання, що пов'язано з поширенням вегетаріанського способу життя, аюрведичних знань та рекомендацій [1]. Доведено, що адаптація та інтеграція положень Аюрведи у рекомендації щодо харчування людей має базуватися на знаннях компетентних фахівців в автентичній аюрведичній медицині [2]. Особливо відчувається дефіцит спеціалізованих знань аюрведичних принципів харчування [3].

Тому, розширення асортименту страв, розроблених за рекомендаціями аюрведи є актуальним напрямом. Такі продукти можуть стати не лише смачним, але й функціональним доповненням до раціону, сприяючи гармонізації внутрішніх процесів організму, підвищенню життєвої енергії та покращенню травлення [4, 5].

Особливо це стосується приведення до рівноваги найбільш проблемної конституції людського організму – Вата Доші. Вата доша є однією з трьох основних Дош (Пітта доша, Капха доша) в організації конституції людини. Вона регулює всі фізіологічні процеси людського життя. Дисбаланс Вата доші виникає через надлишок її властивостей у способі життя та харчуванні [6].

Також актуальність запропонованого матеріалу обумовлена кількома факторами. По-перше, існує потреба у розробці спеціалізованих страв для сучасного ресторанного закладу, які враховують принципи аюрведичного харчування, зокрема для людей з переважанням Вата доші. По-друге, на сучасному етапі розвитку харчової галузі відсутні науково обґрунтовані рецептури страв персоналізованих на підтримання балансу Вата доші. По-третє, розробка таких страв має практичну значимість для закладів ресторанного господарства, які прагнуть розширити свій асортимент функціональними продуктами з урахуванням індивідуальних особливостей споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Під час аналізу останніх досліджень та публікацій з метою розроблення рецептур аюрведичних страв, їх практичного завершення використовували знання як традиційної науки про харчування, а також відомості з аюрведичних джерел та приписів [3, 4, 12].

За положеннями Аюрведи відповідальними за всі біологічні, психологічні та фізіологічні, патологічні функції тіла, розуму і свідомості відповідають три Доші – Вата, Пітта і Капха. Концепція Тридоша, є основоположною і найбільш важливою в Аюрведі, оскільки поширює свій вплив за двома основними напрямками – збереження здоров'я і лікування захворювань [7, 8].

Аюрведичне харчування базується на персоналізації раціону за індивідуальною конституцією людини (домінуюча доша або їх поєднанням) та сприяє гармонізації внутрішнього стану людини [9].

Положення Аюрведи першочергово базуються на енергетиці, яку отримує організм від споживаної їжі, збалансованості смаків, витримці сумісності продуктів.

Вата доша – це тип психофізіологічної конституції в Аюрведі, який у своїй природі складається з елементів повітря та простору. Вона має легку, прохолодну та суху якість, керує всім рухом у розумі та тілі, включаючи дихання, кровотік та виведення відходів. Оскільки Вата доша прохолодна, легка і суха, вона балансується за допомогою страв, які її зігрівають, які важкі (маслянисті) за своєю природою, але в той же час легко засвоюються (табл. 1) [10, 11].

Потрібно уникати гарячої, гіркої і гострої їжі. Через свою гіперчутливість ці люди часто страждають від харчових алергій навіть при вживанні такої їжі, яка, зазвичай, цілком прийнятна, в тому

Таблиця 1

Харчові принципи для гармонізації Вата доші за Аюрведою

Принцип харчування	Рекомендації
Тепла та зволожена їжа	Споживати теплі страви, такі як супи, каші, тушковані страви, запечені овочі та страви, що готуються на пару.
Жири та масла	Вживати оливкову олію, топлене масло (гхи), кокосове масло для зволоження організму і підтримки енергії.
Легко перетравлювана їжа	Обирати легко перетравлювані продукти, такі як каші, супи, варене м'ясо або риба, що не перевантажують травну систему
Теплі напої	Вживати теплі трав'яні чаї з імбиром, корицею, кардамоном та іншими прянощами для покращення травлення.
Регулярність прийому їжі	Дотримуватись чіткого режиму харчування, їсти в один і той самий час кожного дня для стабільності травлення.
Солодкий, кислий та солоний смак	Вживати продукти, що мають солодкий, кислий або солоний смак (мед, молоко, варені овочі, кисле молоко, лимон).
Обмеження холодних і сухих продуктів	Уникати холодної та сухої їжі, як-от сирі овочі, чіпси, хліб, оскільки вони можуть погіршити дисбаланс.

Таблиця 2

Порівняльна оцінка впливу складових рецептури на рівновагу дош

Інгредієнт	Доша, яку врівноважує	Основна дія	Енергія (Вірья)
Кисломолочний сир	Пітта, Вата	Живить, охолоджує, стабілізує	Охолоджуюча
Яйця	Вата	Відновлення, формування тканин	Зігріваюча
Рисове борошно	Вата, Пітта	Легкозасвоюване джерело енергії	Нейтральна
Фініки	Вата	Поживні, відновлюють силу, заспокоюють	Охолоджуюча
Грецький йогурт	Вата, Пітта	Пробіотичний, охолоджуючий	Охолоджуюча
Імбир, кориця, кардамон, мускат	Вата, Капха	Стимуляція травлення, розігрівання	Зігріваюча

числі і для них самих за звичайних обставин [12, 13].

Наукове обґрунтування та розроблення аюрведичних страв для інноваційного меню сучасного ресторанного закладу які сприяють підтриманню рівноваги Вата (доші), з використанням натуральних інгредієнтів та прянощів із зігрівальними та зволожувальними властивостями.

Виклад основного матеріалу. 1. Розроблено рецептуру солодкої запіканки для врівноваження Вата Доші. Характеристика основної сировини аюрведичної запіканки: сир кисломолочний 5% – основа білкової структури запіканки, джерело кальцію, фосфору, вітамінів групи В. Формує основу текстури та забезпечує ніжність виробу. Грецький йогурт збагачує продукт пробіотиками, позитивно впливає на мікрофлору кишечника, додає кремовості та легкості текстурі запіканки. Рисове борошно є безглютеновою альтернативою пшеничного борошна, покращує консистенцію виробу, містить легкозасвоювані вуглеводи. Фініки виконують роль натурального підсолоджувача, багаті на харчові волокна, природні цукри, калій, залізо та антиоксиданти. Використано сорт Мазафаті відомий своїм насиченим солодким смаком з карамельно-медовими відтінками, м'яккою та маслянистою консистенцією, що робить його ідеальним натуральним заміником цукру у рецептурі функціональної запіканки. Кориця мелена – сприяє нормалізації рівня цукру в крові, покращує смак і аромат запіканки. Кардамон – має тонізуючі властивості, покращує травлення, надає вишуканий пряний аромат. Мускатний горіх мелений – додає глибокого теплого смаку, позитивно впливає на нервову систему та травлення. Імбир сушений мелений – має проти-запальні та зігріваючі властивості, активізує обмін речовин, надає пряної пікантності [14]. В табл. 2 наведено порівняльну оцінку впливу складових рецептури на рівновагу дош.

У табл. 3 наведено рецептуру солодкої запіканки для людей конституції Вата доша

Таблиця 3

Рецептура інноваційної солодкої запіканки для людей конституції Вата доша

Інгредієнт	Масова частка, %	Маса нетто для одного зразка, г
Фініки Мазафаті (дрібно порізані)	10	12
Грецький йогурт	18	22
Кисломолочний сир	63	80
Курачі яйця	6	7
Рисове борошно	4	5

Наведена рецептура забезпечує високі органолептичні показники – гармонійний смак, приємну консистенцію та естетичний зовнішній вигляд.

Результати сенсорного аналізу свідчать, що найвищу балову оцінку (24) отримала запіканка, до рецептури якої вносили композицію прянощів, зокрема 2 частини кориці та по 1 частині імбиру, кардамону і мускатного горіха. Цей зразок мав найвиразніший аромат, приємну теплу пряність, гармонійну консистенцію та добре збалансований смак.

Запіканка має ніжну, злегка вологу консистенцію, приємний аромат прянощів і природну солодкість фініків. Перед подачею її можна оздобити сухофруктами, насінням або полити натуральним йогуртом. Готову запіканку зображено на рис. 1.



Рис. 1. Солодка запіканка за аюрведичними рекомендаціями для людей типу Вата доша

Розроблена технологічна схема виготовлення інноваційної запіканки є адаптованою до умов як закладів ресторанного господарства, так і побутового приготування, що свідчить про універсальність і практичну доцільність впровадження запропонованого продукту в щоденний раціон різних груп споживачів.

2. Розробка стосувалася аюрведичної холодної закуски з йогурту, а саме дадхі з додаванням до молока йогуртової культури, що складається з закваски грецького йогурту та спецій асафетида та карі. Страва призначена для спеціалізованого харчування людей типу Вата-конституції.

Дадхі – це Дугдха Вікруті, що означає молочний продукт. Аюрведа вважає молоко та похідні продукти одним з найважливіших джерел живлення тканин організму. Його присутність у раціоні Вата доші зменшує притаманну їй сухість та тривожність [12].

Асафетида завдяки своїй схожості до цибулі та часнику має гострий смак, який з легкістю може розігрівати тіло. Асафетида допомагає зменшити газоутворення та здуття, що часто турбує людей конституції Вата-Доша [15]. Другою пріятністю в рецептурі інноваційного дадхі є листя карі. Завдяки м'якому пряному аромату

та нутрієнтному складу дозволяє знизити дисбаланс Вата Доша.

Встановлено кількість додавання листя карі в інноваційний продукт – дадхі. Модельні зразки розраховувалися на 100 г молока. Зразки: №1 – 1,5 г; №2 – 2,5 г; №3 – 3,5 г. Температура екстракції 50°C. Час 10 хв. (табл. 4).

Для визначення оптимального часу екстрагування використовували листя карі – 2,5 г на 100 г молока, що обрано за бальовим оцінюванням у попередньому досліді. Зразки: № 1 – 7 хв; № 2 – 10 хв; № 3 – 12 хв; № 4 – 15 хв. Температура екстракції 50°C (табл. 5).

Здійснені досліді дозволили встановити: кількість листя 2,5 г на 100 г молока з часом екстракції 12 хв. при температурі 55°C. В табл. 6 наведено отримані дані щодо фізико-хімічних параметрів молочного відвару з листям карі.

Після сквашування закваскою грецького йогурту (0,5 г закваски на 1 літр молока.) в дадхі додається асафетида – кількість 0,5 г на 150 мл. Витримка з спецією 10 хвилин та фільтрування за температури +2..4°C 2 години.

Технологія виробництва інноваційного дадхі дозволяє отримати продукт однорідної маси, світлого кольору з жовтим відтінком. Консистенція

Таблиця 4

Результати бального оцінювання дослідних зразків із визначенням оптимальної кількості листя карі

Зразок	Опис	Балове оцінювання			
		А	Б	В	Г
№1	Ледь відчутний аромат, молочний колір, приємний ледь відчутний смак пряності листя	3	3	4	3
№2	Молочний колір зі слабким відтінком зеленого/жовтого, яскравий аромат листя, відчувається солодкість молока та пряність листя	5	5	4	4
№3	Жовто-зелений відтінок сильно помітний, яскраво виражений аромат, терпкий смак	5	5	2	3

Примітка: А – зовнішній вигляд, Б – колір, В – смак, Г – аромат

Таблиця 5

Результати бального оцінювання дослідів для визначення оптимальної кількості часу настоювання листя карі в молоці

Зразок	Опис	Балове оцінювання			
		А	Б	В	Г
№ 1	Вершковий колір з ледь помітним відтінком жовтого, яскраво виражений аромат, легкий присмак листя	4	4	3	5
№ 2	Молочний колір зі слабким відтінком зеленого/жовтого, яскравий аромат листя, відчувається солодкість молока та пряність листя	5	5	4	4
№ 3	Молочний колір з зеленим відтінком, яскраво виражений аромат, терпкий пряний смак	5	5	3	5
№ 4	Освіжаючий пряний аромат, колір молочний з яскравим зеленим відтінком, терпкий пряний смак	5	5	4	4

Примітка: А – зовнішній вигляд, Б – колір, В – смак, Г – аромат

Таблиця 6

Фізико-хімічні параметри молочного відвару з листям карі

рН	7,3-7,5
Колір	Молочний з відтінком зеленого
Аромат	Яскравий, приємний, пряний, з нотками солоконості
Смак	Пряний, м'який смак, з відчутною солодкістю молока

густа та однорідна, без відділення сироватки. Відчутний аромат листя, присутня приємна гострота.

3. Розроблено інноваційний аюрведичний продукт – овочевий паштет «Бабагануш» на основі печених баклажанів. Додавання суміші горіхів та композиції прянощів із зігрівальними та зволожувальними властивостями (імбир, кумин, асафетида) сприяє підтриманню рівноваги Вата Доші. Встановлено оптимальне співвідношення компонентів у розробленій рецептурі, що забезпечує збалансування «холодного» та «сухого» ефекту овочевих страв.

Горіхи та насіння, з аюрведичної точки зору, особливо корисні для Вата доші завдяки своїм зігріваючим, заземлюючим та зволожувальним властивостям [13].

Таблиця 7

Рецептурний склад модельних композицій овочевого паштету «Бабагануш»

Інгредієнти	Дослідні зразки, г		
	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
Імбир	3	2	2,5
Кумин	2,5	3	2,5
Асафетида	1,5	3,5	2
Сіль	1	1	1
Баклажани свіжі	185	185	185
Горіхова суміш (мигдаль, кеш'ю)	20	20	20
Часник свіжий	5	5	5
Лимони свіжі	10	10	10
Оливкова олія	12	12	12
Вихід	240	240	240

В страві «Бабагануш» запікання баклажанів формує характерний димний аромат та м'яку, ніжну текстуру. Запікання проводиться за розробленим режимом – початкове обсмажування при 180-200°C з подальшим тушкуванням при 90-95°C. Це сприяє формуванню смакових якостей страви, дозволяє овочам швидко розм'якшитися

Таблиця 8

Порівняльний аналіз поживної цінності досліджуваних виробів

Найменування	Контрольний зразок	Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3
Білки, г	205,68	209,56	209,88	209,52
Жири, г	296,37	304,92	304,47	304,29
Вуглеводи, г	68,32	74,28	77,16	74,88

та набуті потрібної консистенції із збереженням корисних харчових речовин (табл.8). Оптимальний ступінь готовності визначається візуально та тактильно, щоб уникнути надмірної водянистості або, навпаки, занадто сухої структури.

Зразок №3 характеризується оптимальною консистенцією, стабільним рівнем рН (6,8-7,1) та мінімальними втратами маси під час запікання баклажанів (8%).

Поживна цінність зразка №3 є збалансованою: енергетична цінність становить 588,69 ккал, вміст білків – 52,38 г, жирів – 33,81 г, вуглеводів – 18,72 г на 240 г готового продукту. Такі параметри відповідають принципам балансування Вата-доші, оскільки забезпечують достатню поживність та вміст корисних жирів, що необхідні для заспокоєння нервової системи та підтримки травлення.

Для збереження якості готової продукції рекомендовано дотримуватися таких умов зберігання: температура +4±1°C, відносна вологість 65-70%, термін придатності – 3-5 діб у герметичній або вакуумній упаковці. Заморожування (-18°C) дозволяє зберігати продукцію до 1 місяця.

Висновки. Наведені розробки пропонують сучасну модель рецептурного рішення з впровадженням у меню ресторанних закладів зі вегетаріанським та аюрведичним харчуванням, розширюючи асортимент страв для людей конституції Вата Доша, а також для різних категорій споживачів.

Запропоновані інноваційні розробки є важливим кроком у напрямку інтеграції традиційних кулінарних практик з сучасними концепціями дієтичного та аюрведичного харчування, що робить їх актуальними як у науковому, так і у практичному контексті.

Представлені в статті розробки можуть нести конкурентну перевагу для підприємств, які прагнуть відповідати сучасним тенденціям здорового харчування.

Список літератури:

1. Kovalenko S. The influence of Ayurveda on healthy lifestyle trends in Ukraine. *Nutrition and Health*. Zhytomyr, 2024. Vol. 12, № 2. P. 56–62.
2. Petrova A., Ivanov M., Kuznetsova L. Education and competence in Ayurvedic nutrition: A Ukrainian perspective. *Journal of Alternative Medicine*. Odesa, 2023. Vol. 18, № 4. P. 245–253.

3. Ivanov P., et al. Scientific awareness of Ayurveda in Ukraine : challenges and solutions. *Journal of Integrative Medicine*. Shanghai, China, 2022. Vol. 10, № 1. P. 45–52.
4. Lee S., Park J., Kim H. Development of functional foods based on traditional knowledge. *Food Science and Biotechnology*. Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2022. Vol. 31, № 5. P. 567–575.
5. Dixit V., Joseph Kamal S. W., Bajrang Chole P., Dayal D., Chaubey K. K., Pal A. K., et al. Functional foods: exploring the health benefits of bioactive compounds from plant and animal sources. *Journal of Food Quality*. 2023. Article ID 5546753. DOI : <https://doi.org/10.1155/2023/5546753>. Edited by Anet Rezek Yambrak, University of Zagreb, Croatia.
6. Павлишин М. О. Фізіологічні аспекти харчування при різних конституційних типах. *Науковий вісник Національного університету харчових технологій*. Київ, 2022. № 4. С. 112–120.
7. Unnikrishnan R., Venkatasubramanian P. Exploring Ayurvedic knowledge on food and health for providing innovative solutions to contemporary healthcare. *Frontiers in Public Health*. 2016. Vol. 57. DOI: 10.3389/fpubh.2016.00057.
8. Ачар'я Балкрішна. Практичний посібник науки Аюрведи. Загальний poradnik для здорового життя / пер. з англ. Г. Яновської. Київ, 2020. 474 с.
9. Smith L., Johnson R. Personalizing diet: Ayurvedic perspectives in modern nutrition. *Nutrition Reviews*. 2021. Vol. 79, № 6. P. 705–716. DOI: 10.1201/9781003315100. London : Taylor & Francis.
10. Свобода Р. Пракрити. Аюрведичний погляд на конституцію людини. Київ : Ганга, 2005. 304 с.
11. Вата в аюрведичній дієті та особливості цієї доші. URL: <https://chomu.koshachek.com/articles/vata-v-ajurvedichnij-dieta-ta-osoblivosti-ciei.html> (дата звернення : 01.10.2025).
12. Rosa-pharm.com. Recipes of Ayurvedic cuisine. URL: <https://rosa-pharm.com/uk/retsepty-ayurvedicheskoy-kulinarii> (accessed : 01.10.2025).
13. Збалансуйте доші Вата, Пітта, Капха з харчуванням. URL: <https://chomu.koshachek.com/articles/zbalansujte-doshi-vata-pitta-kapha-z-harchuvannjam.html> (дата звернення : 01.10.2025).
14. Нові класи інгредієнтів продуктів харчування та їхні функціональні властивості. URL: <http://www.medved.kiev.ua/web.../3-4.../str61.pdf> (дата звернення: 01.10.2025).
15. Асафетида – Енциклопедія спецій – опис, застосування в кулінарії, корисні властивості. *Spiceryshop*. URL: <https://spiceryshop.com.ua/content/enciclopedia/asafetida> (дата звернення: 01.10.2025).

Frolova N.E., Borysova E.O., Samoilenko P.O., Hmyria O.O. DEVELOPMENT OF AYURVEDIC DISHES FOR THE INNOVATIVE MENU OF A MODERN RESTAURANT

The article examines modern developments in Ayurvedic dishes for the innovative menu of a contemporary restaurant. Based on the principles of Ayurvedic nutrition, graduate students of the professional educational program “Technology of Dietary and Ayurvedic Food Products” at the National University of Food Technologies have developed an assortment of Ayurvedic dishes designed to bring the most vulnerable psychophysiological constitution of the human body, Vata Dosha, into a state of balance. The recommendations of Ayurveda regarding the selection and combination of products for Vata Dosha, tables of compatibility of plant raw materials, and collections of Ayurvedic recipes were consulted.

A recipe for a sweet casserole intended to balance Vata Dosha using dates as a natural sugar substitute has been developed. A composition of spices – cinnamon, cardamom, dried ginger, and nutmeg – was employed.

As an alternative to the traditional wheat ingredients of the classic recipe, rice flour was used, which makes the product suitable for individuals with gluten intolerance.

For the specialized nutrition of people with a Vata body constitution, a recipe for an Ayurvedic cold snack made of yogurt has been developed, namely dadhi with the addition of non-traditional plant raw materials – asafetida and curry – ensuring the high nutritional value of the product.

An innovative Ayurvedic product – an eggplant-based vegetable pâté for the dish “Baba Ganoush” – has also been developed. This product, prepared with a mixture of nuts and a composition of spices with warming and moisturizing properties (ginger, cumin, asafetida), aims to maintain the balance of Vata Dosha. The optimal ratio of components in the recipe of vegetable pâtés has been established, which ensures the balance of the “cold” and “dry” effects of vegetable dishes on the human body.

These developments offer a modern model of recipe solutions for the inclusion of vegetarian and Ayurvedic food in restaurant menus, expanding the range of dishes for people of the Vata Dosha constitution and for different categories of consumers. Such dishes can become a competitive advantage for enterprises striving to meet current trends in healthy eating.

Key words: Ayurveda, Vata Dosha constitution, nutrition, innovative dishes.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 13.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

ТРАНСПОРТ

УДК 629.1.04:621.36

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/36>

Кириченко О.С.

Національний транспортний університет

Клочков Ю.П.

Національний транспортний університет

Мельник В.Ю.

Національний транспортний університет

Коломієць Д.П.

Національний транспортний університет

Вечурко О.М.

Національний транспортний університет

Шевченко В.І.

Національний транспортний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ГІРОСКОПІВ СУДНОВОЇ НАВІГАЦІЇ

Сучасні суднові навігаційні системи потребують надійних приладів визначення курсу. У зв'язку з цим гірокомпаси часто оснащують волоконно-оптичними гіроскопами. Даний тип гіроскопів відносять до високоточних оптико-електронних приладів, які здатні забезпечити визначення курсу судна незалежно від сигналів GPS та інших навігаційних приладів. Волоконно-оптичні гіроскопи часто оснащені термоелектричними модулями Пельтьє для охолодження суперлюмінесцентних діодів (SLD), що формують інтерференційний сигнал в оптоволокні джерел оптичного випромінювання. Експлуатація в реальних судових умовах потребує наявності додаткового ізоляційного захисту термоелектричних компонентів від підвищеної вологості, соляного туману та вібрацій. У даній роботі було розроблено мініатюрний термоелектричний модуль з модифікованим епоксидним компаундом. На основі створених креслень було створено просторову модель модуля, яку було досліджено чисельним методом розрахунку. Результати розрахунку термоелектричного модуля волоконно-оптичного гіроскопа при амперажі від 0 до 2 А було використано для побудови його характеристик у вигляді графіків функціональних залежностей основних величин, а також плоских і тривимірних поверхонь співвідношення величин. Аналіз результатів дозволив оцінити ефективність використання розробленого мініатюрного термоелектричного модуля у волоконно-оптичних гіроскопах судових навігаційних систем.

У виконаному дослідженні проведено аналіз ТЕМ з геометричними розмірами $8 \times 8 \times 3$ мм, згідно цим розмірам його можна віднести до класу мініатюрних термоелектричних модулів. Термоелектричний ланцюг ТЕМ було сформовано на базі 21-ї P-N-термопари, що налічувала II напівпровідників P- і II напівпровідників N-типу. Розмір напівпровідників складав $0,82 \times 0,82 \times 1,5$ мм. В якості матеріалу обох типів напівпровідників було використано телурид вісмуту Bi_2Te_3 , з коефіцієнтами Зеебека $\alpha_p = +1,8 \cdot 10^{-4}$ В/К і $\alpha_n = -1,8 \cdot 10^{-4}$ В/К, для контактних комутаційних пластин – мідь, а для корпусу – кераміку Al_2O_3 . Всередині модуль було заповнено модифікованим епоксидним компаундом з модулем

© Кириченко О.С., Клочков Ю.П., Мельник В.Ю., Коломієць Д.П., Вечурко О.М., Шевченко В.І., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Юнга $E=10$ ГПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu=0,2$, коефіцієнтом теплопровідності $k=1,0$ Вт/(м·К), коефіцієнтом теплового розширення $\alpha_m=1,2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹. Моделювання ТЕМ з використанням чисельного методу проводилось з урахуванням електричних, теплових і механічних процесів. Встановлено, що при робочому струмі ТЕМ 0,6-0,75 А наявний температурний перепад між сторонами модуля – 20-27 °С. В дослідженні, також, розглянуто можливості для проведення подальшої оптимізації матеріалів ТЕМ і його конструктивних особливостей для розробки нових поколінь мініатюрних охолоджувальних модулів для волоконно-оптичних гіроскопів систем суднової навігації.

Ключові слова: моделювання, термоелектричний модуль, робочі характеристики, волоконно-оптичні гіроскопи, суднова навігація.

Постановка проблеми. Волоконно-оптичні гіроскопи (FOG) характеризуються високою точністю, надійністю та відсутністю рухомих частин і є складовою частиною гірокомпасів [1, 2], які широко застосовуються у суднових навігаційних системах. Їх ефективність значною мірою залежить від стабільності температурного режиму, зокрема роботи суперсвітлолюмінесцентних діодів (SLD) – основних джерел оптичного випромінювання, необхідного для формування інтерференційного сигналу. Термоелектричні модулі (ТЕМ) забезпечують теплову стабільність SLD [3-6], однак їхні характеристики змінюються під впливом реальних суднових умов експлуатації, таких як, підвищена вологість, соляний туман, вібрації [7, 8]. Тому актуальним є створення просторової моделі термоелектричного модуля з модифікованим компаундом для подальшого аналізу чисельним методом [9] його робочих характеристик в умовах, наближених до експлуатаційних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Волоконно-оптичні гіроскопи займають одне з основних місць у складі суднових гірокомпасів завдяки високій точності та відсутності рухомих частин, що ґрунтовно висвітлено у працях із теорії та практики FOG [1-4]. Критичною умовою стабільності є температурне керування джерелами випромінювання: для SLD широко застосовують термоелектричні модулі Пельтьє та відповідні алгоритми контролю [5, 6]. Розвиток апаратних засобів керування температурою інерціальних і MEMS-вузлів демонструє ефективність компактних ТЕС-контролерів і схем тепловідведення [10-12]. Матеріалознавчу та методичну основу формують роботи з термоелектрики й параметризації матеріалів і з'єднань, а також узагальнення щодо термоелектричного охолодження оптоелектронних компонентів [13-16]. Для мініатюрних ТЕМ у транспортній та морській тематиці описано геометричні рішення [17, 18], варіанти контактних з'єднань і конвективні підходи до тепловідведення [19, 20], демпфування термонапружень і чисельне 3D-моделювання [21-24], а для маш-

табних енергетичних систем розглянуто оцінку термоелектричних генераторів в установках ОТЕС [25]. Узагальнено, що важливою задачею є інтеграція високостабільних оптичних джерел із мініатюрними ТЕМ, що зберігають надійність у морському середовищі (вологість, соляний туман, вібрації) і не погіршують масо-габаритних показників навігаційних систем [3, 5, 6, 17, 18].

Метою статті є моделювання робочих характеристик термоелектричного модуля з модифікованим епоксидним компаундом для оцінки його ефективності у забезпеченні температурної стабільності суперлюмінесцентних діодів у волоконно-оптичних гіроскопах суднової навігації.

Виклад основного матеріалу. Для опису волоконно-оптичного гіроскопа як частини системи навігації та управління курсом судна, можна розглянути кілька основних рівнянь. Волоконно-оптичний гіроскоп вимірює кутову швидкість на основі ефекту Саньяка, а потім ці дані інтегруються для визначення курсу судна [1-3]. Нижче наведено декілька основних рівнянь для моделювання поведінки волоконно-оптичного гіроскопа у навігаційній системі.

Основне рівняння для волоконно-оптичного навігаційного гіроскопа базується на ефекті Саньяка:

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi A\Omega}{\lambda c}, \quad (1)$$

де $\Delta\varphi$ – зсув фази між двома протилежними світловими хвилями, рад;

A – площа, охоплена оптичним волокном, м²;

Ω – кутова швидкість обертання судна, рад/с;

C – довжина хвилі світла, м;

c – швидкість світла у вакуумі ($\sim 3 \cdot 10^8$ м/с).

Обробка сигналу з волоконно-оптичного гіроскопа забезпечує визначення кутової швидкості, яка використовується для оцінки зміни курсу судна:

$$\Omega = \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda \hbar}{8\pi A}. \quad (2)$$

Це дає змогу отримати миттєву кутову швидкість, яка інтегрується для визначення кута повороту (курсу):

$$\psi(t) = \int_0^t \Omega(\tau) d\tau, \quad (3)$$

де $\psi(t)$ – курс судна в момент часу t , рад;
 $\Omega(\tau)$ – кутова швидкість, рад/с;
 t – час, с.

Якщо волоконно-оптичний гіроскоп входить до складу системи автоматичного керування курсом, можна описати систему керування в якості наступної моделі управління курсом судна:

$$T \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = K \cdot u(t), \quad (4)$$

де T – стала часу судна (інерційність), с;

K – коефіцієнт підсилення, рад/с / од. керуючого сигналу;

$u(t)$ – вхідний сигнал (наприклад, з автопілота чи рульового механізму), рад/с або умовні одиниці, залежить від реалізації.

Якщо використовується зворотний зв'язок на основі вимірювань волоконно-оптичного гіроскопа, то вираз для вхідного сигналу буде наступний (ПД-регулятор):

$$u(t) = -k_p (\psi(t) - \psi_{\text{зад}}(t)) - k_d \Omega(t) \quad (5)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал, од. керування;

$\psi(t)$ – поточний курс, рад;

$\psi_{\text{зад}}(t)$ – бажаний курс, рад;

k_p – коефіцієнти пропорційного регулятора, од./рад;

k_d – коефіцієнти диференціального регулятора, од.·с/рад.

У виразі (5) використано негативні знаки, тому що регулятор із від'ємним зворотним зв'язком, який зменшує відхилення курсу: різниця $(\psi(t) - \psi_{\text{зад}}(t))$ – це помилка курсу; якщо поточний курс більше за бажаний, регулятор подає команду на зменшення повороту (протидію); згладжує зміну курсу: доданок $k_d \Omega(t)$ вводить демпфування, тобто зменшує амплітуду осциляцій за

рахунок пропорційного врахування швидкості обертання. Рівняння (1)-(5) описують як вимірювання орієнтації судна, так і управління курсом на основі сигналів волоконно-оптичного гіроскопа.

Модуль керування джерелами світла волоконно-оптичного гіроскопа (рис. 1), використаний у роботі [3], забезпечує стабільну роботу двох суперлюмінесцентних діодів (SLD) різної потужності, які працюють на різних довжинах хвиль. Блок автоматичного керування струмом (ACC) подає однаковий струм на обидва діоди, з'єднані послідовно, що зменшує флуктуації потужності та пов'язані шумові спотворення; це реалізується завдяки зворотному зв'язку, який регулює струм на основі вимірюваного падіння напруги на єдиному контрольному елементі в колі живлення. Через різницю в оптичній потужності джерел, змінний оптичний атенуатор встановлюється на діод із вищою потужністю для балансування інтенсивностей випромінювання, що забезпечує симетрію сигналів і покращує точність вимірювань. Кожен SLD має окремий блок автоматичного керування температурою (ATC), який містить термоелектричний модуль Пельтьє та терморезистор з від'ємним температурним коефіцієнтом опору (ТКС); останній забезпечує зворотний зв'язок для точного підтримання температури. Такий контроль є критично важливим для стабільності спектральних характеристик джерел і зменшення температурних дрейфів навігаційних волоконно-оптичних гіроскопів [4-6, 11]. Оптичні сигнали з обох джерел об'єднуються за допомогою мультиплексора для подальшої інтерферометричної обробки.

Для ефективного охолодження суперлюмінесцентних діодів (SLD) у волоконно-оптичних

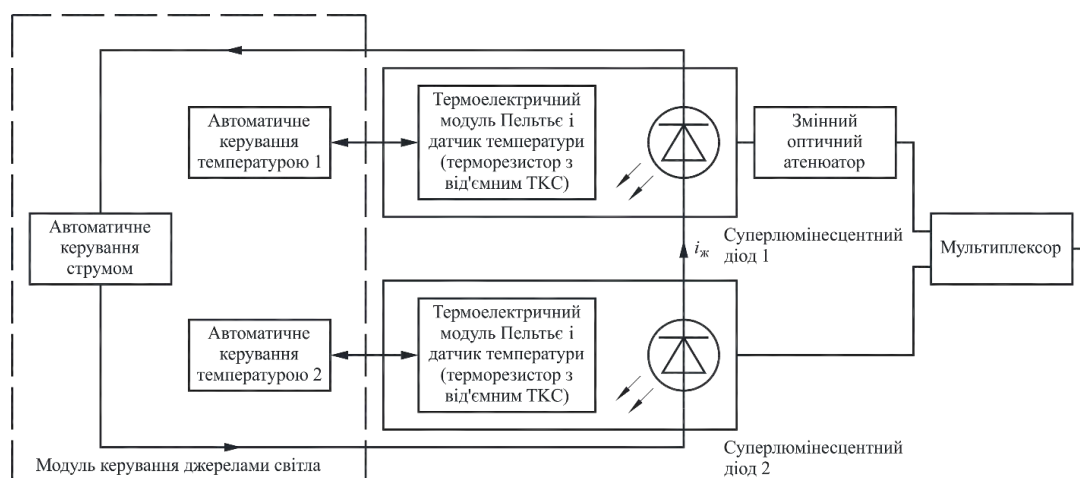


Рис. 1. Схема модуля керування джерелами світла з термоелектричними модулями Пельтьє для диференційного волоконно-оптичного навігаційного гіроскопа

навігаційних гіроскопах застосовуються мініатюрні термоелектричні модулі Пельтьє. Один із таких модулів має розміри $8 \times 8 \times 3$ мм і містить 22 напівпровідникові елементи (11 P - і 11 N -типів), з'єднані у 21 термопару через 23 мідні контактні пластини [19, 26]. Елементи розташовані симетрично у корпусі 8×8 мм у конфігурації 4×6 , з міжелементними відстанями 0,44 мм по горизонталі та 0,94 мм по вертикалі. Розмір кожного елемента становить $0,82 \times 0,82 \times 1,5$ мм (об'єм 1 мм^3), що забезпечує компактність конструкції. Контактні пластини товщиною 0,2 мм мають ширину 0,82 мм і довжину 2,58 мм (поздовжні) та 2,08 мм (поперечні), із виступами висотою 0,1 мм для надійного електричного контакту. Напівпровідники виготовлені з телуриду вісмуту Bi_2Te_3 , корпус – з кераміки Al_2O_3 , а заповнення – з модифікованого епоксидного компаунду, що відрізняється від згаданого в джерелах [19, 26] і має інші фізичні характеристики. Також змінені термоелектричні коефіцієнти Зеебека для матеріалів P - та N -типів. П-подібна структура модуля ($6,11 \times 7,12 \times 1,9$ мм) сприяє рівномірному розподілу тепла, ефективному тепловідведенню та мінімізації втрат.

Для аналізу процесу охолодження суперлюмінесцентних діодів (SLD) за допомогою термоелектричних модулів розглянуто електричні та теплові рівняння [6, 13, 16, 27], що враховують опір напівпровідників і контактів, описують баланс між холодною і гарячою сторонами модуля. Електричне рівняння для напруги U на термоелектричному модулі можна записати в наступному вигляді:

$$U = \alpha(T_h - T_c) + IR, \quad (6)$$

T_h – ефективний коефіцієнт Зеебека, В/К;

T_h – температура гарячої сторони, К;

T_c – температура холодної сторони (фіксовано $293,15 \text{ К} \approx 20^\circ\text{C}$), К;

I – електричний струм, А;

R – електричний опір модуля, Ом.

Тепловий баланс холодної сторони, що описує кількість тепла, яке відводиться від охолоджуваного об'єкта:

$$\dot{Q}_c = \alpha IT_c - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c), \quad (7)$$

$\dot{Q}_c$ – відведене тепло з холодної сторони, Вт;

K – теплопровідність модуля між сторонами, Вт/К.

Тепловий баланс гарячої сторони, що визначає теплове навантаження, яке необхідно відвести від гарячої поверхні:

$$\dot{Q}_h = \alpha IT_h + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c), \quad (8)$$

$\dot{Q}_h$ – тепловий потік на гарячій стороні, Вт.

Конвективне відведення тепла можна записати як вираз моделі тепловідведення за рахунок конвекції в навколишнє середовище:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_h(T_h - T_\infty), \quad (9)$$

$\dot{Q}_{\text{conv}}$ – тепло, відведене конвекцією, Вт;

h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К;

A_h – площа гарячої керамічної пластини, м²;

T_∞ – температура навколишнього середовища ($293,15 \text{ К}$), К.

Рівняння для тепловідведення тепловим випромінюванням:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_h(T_h^4 - T_\infty^4), \quad (10)$$

$\dot{Q}_{\text{rad}}$ – тепло, відведене конвекцією, Вт;

ε – ступінь чорноти поверхні;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – стала Стефана-Больцмана, Вт/(м²К⁴).

Баланс гарячої сторони як умова теплової рівноваги гарячої поверхні при стаціонарному режимі:

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}}, \quad (11)$$

Узагальнене рівняння гарячої поверхні представляє собою нелінійне рівняння для визначення температури гарячої сторони T_h при відомих струмі I та умовах навколишнього середовища:

$$\alpha IT_h + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c) = hA_h(T_h - T_\infty) + \varepsilon \sigma A_h(T_h^4 - T_\infty^4). \quad (12)$$

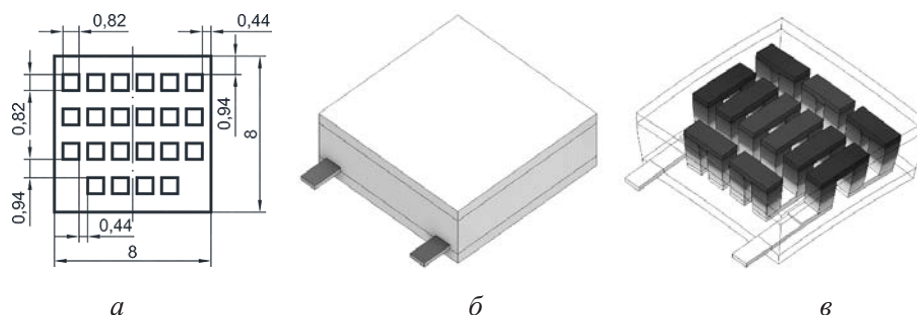


Рис. 2. Термоелектричний модуль Пельтьє волоконно-оптичного навігаційного гіроскопа: а – геометрія; б – пристрій у зібраному вигляді; в – П-подібний термоелектричний ланцюг

Рівняння (6)-(12) є базовою моделлю термоелектричного охолоджувача суперсвітлодіодного діода SLD, з яких можна виводити робочі характеристики (напруга, тепловідведення, коефіцієнт продуктивності охолодження COP).

Враховуючи результати попередніх досліджень, присвячених підвищенню надійності термоелектричних модулів охолодження [28, 29] та температурній стабілізації в оптичних гіроскопах [30, 31], у даній роботі було досліджено температурний розподіл і теплові потоки в термоелектричному модулі для охолодження SLD за умов ідеального тепловідведення з холодної сторони (ізотерма 20 °C). Під час моделювання методом скінченних елементів прийнято наступні допущення: на торцевій поверхні останньої контактної пластини ланцюга встановлювався електричний потенціал $\phi_0=0$ В, температура холодних пластин приймалася $t_0=20$ °C, торці першої та останньої пластини вважалися жорстко закріпленими,

а всі матеріали моделі – ізотропними. Теплообмін із навколишнім середовищем відбувався примусовою конвекцією та тепловим випромінюванням з гарячої керамічної пластини корпусу за таких параметрів: коефіцієнт тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·K), температура оточуючого середовища $t_{oc}=20$ °C, коефіцієнт емісії $\varepsilon_{тв}=0,9$. Властивості матеріалів задавалися окремо для кожного компонента конструкції. Для напівпровідників на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3) приймалися коефіцієнти Зеебека $\alpha_p=+1,8 \cdot 10^{-4}$ В/К та $\alpha_n=-1,8 \cdot 10^{-4}$ В/К, питомий опір $\rho=1,0 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, теплопровідність $k=1,5$ Вт/(м·K), модуль пружності $E=4,5 \cdot 10^{10}$ Па, коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$, коефіцієнт теплового розширення $\alpha_t=1,4 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹. Для мідних контактних пластин використовувалися параметри $\rho=1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $k=401$ Вт/(м·K), $E=1,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu=0,34$, $\alpha_t=1,65 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹. Для модифікованого епоксидного компаунду із спеціальним наповнювачем, що підвищує елек-

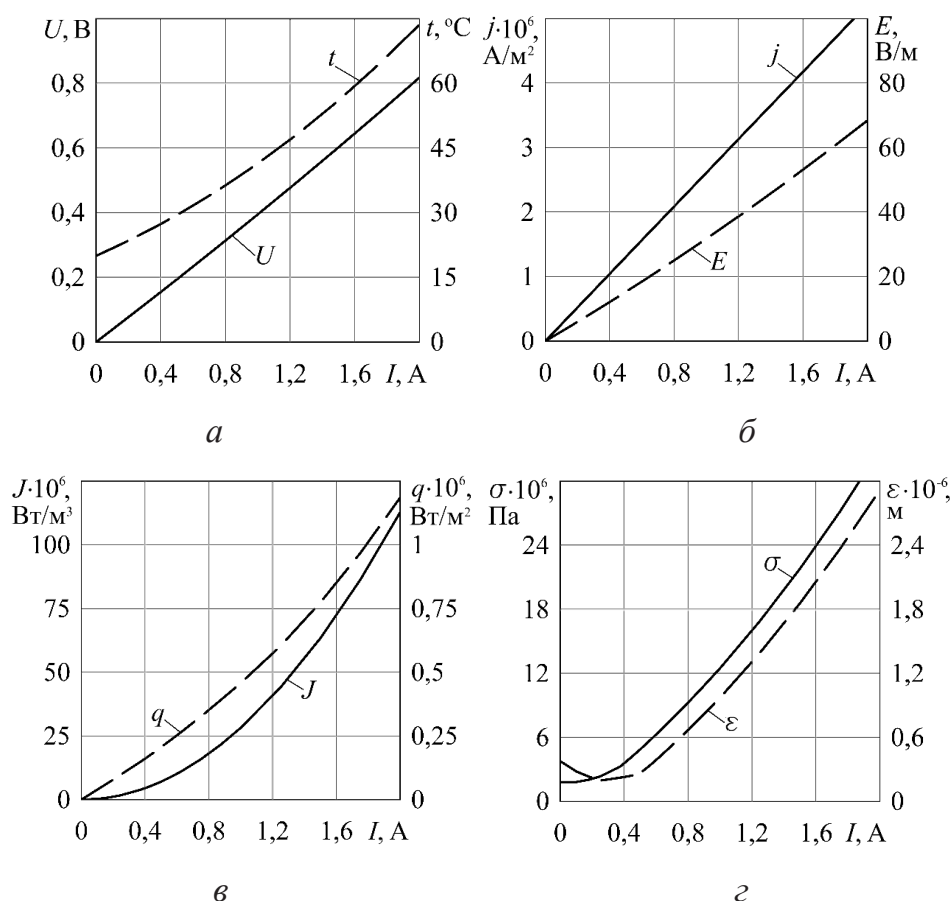


Рис. 3. Багатопараметричне представлення струмових залежностей електротермічних і механічних параметрів у структурі термоелектричного модуля з урахуванням міжфізичних взаємозв'язків: а – напруга U термоелектричного ланцюга з P - та N -елементів і температура t гарячої сторони модуля; б – струмова густина j та напруженість E електричного поля; в – джоулеве тепловиділення J і тепловий потік q ; з – механічні напруження σ і деформаційна відповідь ε напівпровідникового середовища

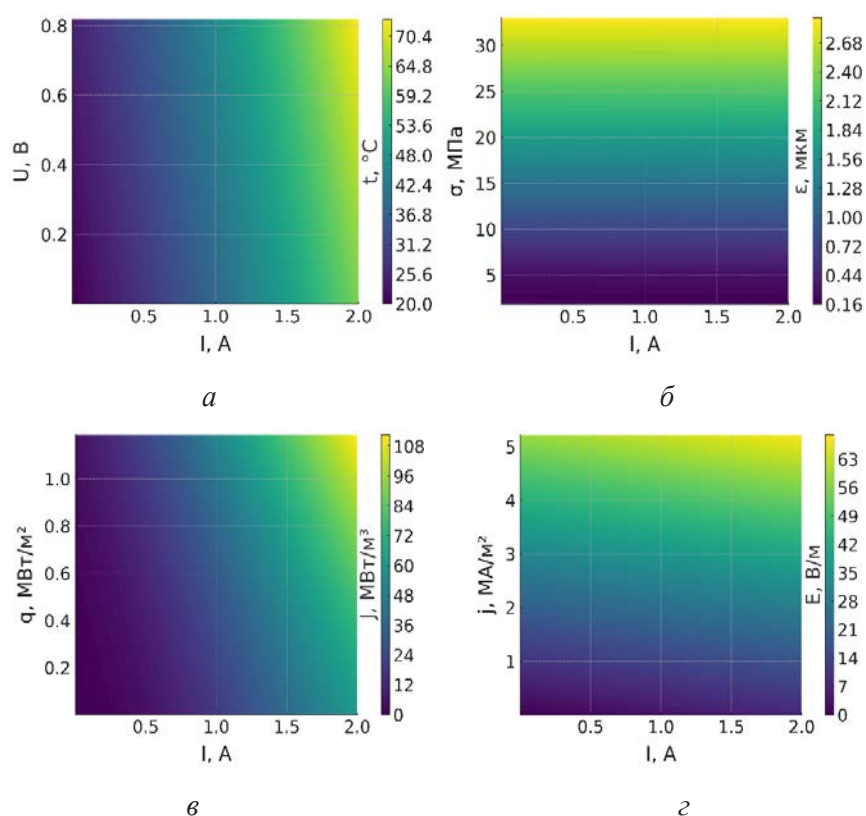


Рис. 4. Градієнтні поверхні співвідношення параметрів термоелектричного модуля при зміні величини струму: *a* – t - I - U ; *б* – ε - I - σ ; *в* – J - I - q ; *г* – E - I - j

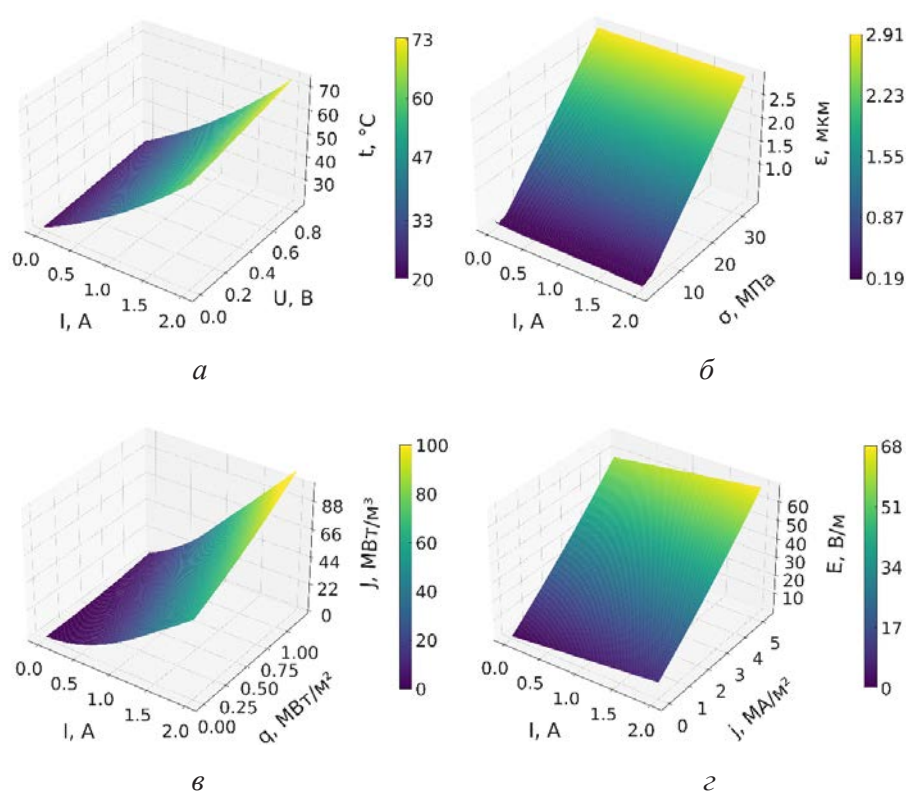


Рис. 5. Тривимірні поверхні відображення струмових залежностей параметрів термоелектричного модуля: *a* – t - U - I ; *б* – ε - σ - I ; *в* – J - q - I ; *г* – E - j - I

троїзоляційні властивості, задавалися характеристики $\rho=1,0 \cdot 10^{15}$ Ом·м, $k=1,0$ Вт/(м·К), $E=10,0 \cdot 10^9$ Па, $\nu=0,3$, $\alpha_T=1,2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹. Для керамічних пластин з оксиду алюмінію (Al_2O_3) приймалися значення $\rho=1,0 \cdot 10^{13}$ Ом·м, $k=30$ Вт/(м·К), $E=3,5 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu=0,22$, $\alpha_T=7,0 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. При типовому електричному підключенні (червоний «+», чорний «-») струм спочатку проходить через напівпровідниковий елемент *P*-типу, а далі через елемент *N*-типу, формуючи послідовний термоелектричний ланцюг у складі модуля.

Результати багатопараметричного аналізу впливу електричного струму *I* на електротермічні та механічні характеристики термоелектричного модуля (рис. 3) демонструють міжфізичні взаємозв'язки, що виникають при зміні струмового навантаження.

На рис. 3, а подано залежності напруги *U* та температури гарячої контактної поверхні *t*, які відображають термопотенціальні зміни. На рис. 3, б наведено залежності густини струму *j* та напруженості електричного поля *E*. Рис. 3, в ілюструє динаміку густини джоулевого тепловиділення *J* та теплового потоку *q*, що визначає теплову ефективність елементів. На завершення, на рис. 3, г представлено залежності еквівалентних механічних напружень σ і деформацій ϵ , які характеризують структурну стабільність модуля.

Аналіз плоских (рис. 4) і тривимірних (рис. 5) градієнтних поверхонь підтвердив узгодженість електричних, теплових і механічних параметрів модуля.

Представлені залежності («*t-U-I*», « $\epsilon-\sigma-I$ », «*J-q-I*», «*E-j-I*») демонструють комплекс взаємозв'язків у багатовимірному параметричному просторі: різке зростання температури при підвищених струмі та напрузі, локалізацію механічних напружень, а також нерівномірність розподілу струму й теплового потоку, що свідчить про перехід від стабільного до критичного режиму. Такий підхід дозволяє визначити оптимальні робочі діапазони для систем охолодження SLD у волоконно-оптичних гіроскопах суднової навігації.

Висновки. Для волоконно-оптичних гіроскопів суднової навігації досліджено мініатюрний термоелектричний модуль розмірами 8×8×3 мм. Модуль побудований на базі 21 *P-N*-термопар (11 елементів *P*- і 11 *N*-типу) з телуриду вісмуту (Bi_2Te_3), комутованих через 23 мідні контактні пластини у П-подібну структуру, забезпечує рівномірний розподіл тепла та ефективне його відведення. Чисельне моделювання показало, що при струмі 0,6-0,75 А досягається робочий режим, який забезпечує формування температурного перепаду між сторонами модуля на рівні 20-27 °С за збереження стабільності електричних параметрів і помірних механічних напружень. Отримані результати підтверджують ефективність використання розробленого термоелектричного модуля для охолодження суперлюмінесцентних діодів у волоконно-оптичних гіроскопах суднової навігації.

Список літератури:

1. Lefèvre H. C. The Fiber-Optic Gyroscope. 3rd ed. Norwood, MA: Artech House, 2014. 370 p.
2. Udd E., Digonnet M. J. F. (Eds.). Design and Development of Fiber Optic Gyroscopes. Bellingham, WA: SPIE Press, 2019. 682 p. DOI: <https://doi.org/10.1117/3.2522292>
3. Yang Y., Li S., Yang F., Jin W. Differential Fiber Optic Gyroscope Driven by Two Broadband Sources of Different Wavelengths. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 65443–65449. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984006>
4. Rózański A., Gawlikowski M., Pysz D. Temperature stabilization in fibre optic gyroscopes for high-performance applications. *Optics and Laser Technology*. 2016. Vol. 86. P. 68–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.06.015>
5. Minnich A. J. Thermoelectric cooling of electro-optic components. In: Rowe D. M. (Ed.), Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2024. Chapter 28. URL: https://www.researchgate.net/publication/389160794_Thermoelectric_Cooling_of_Electro-Optic_Components (Accessed: 22 Sep. 2025).
6. Goldsmid H. Julian. Introduction to Thermoelectricity. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
7. Тимошук О. М., Шапран Ю. А. Аналіз методів та засобів нейтралізації вібрації суднового дизель-генератора. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ : ДУІТ, 2025. Вип. 1(42). С. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.09>
8. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Чередник В. М., Колесник В. В., Пріступа С. В., Мельник В. Ю. Ідентифікація моделі генератора вібрацій з одним ступенем вільності. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ : ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2025. Т. 36(75), № 3. Ч. 1. С. 392–399.
9. Дубинець В. Г., Хільчевський В. В., Савченко О. В. Основи методу скінченних елементів. Чернівці : ЧДТУ, 2007. 288 с.

10. Wright D. N., et al. Thermal management of MEMS element with thermoelectric-cooler. *2021 23rd European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition (EMPC)*, Gothenburg, Sweden, 2021. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.23919/EMPC53418.2021.9584996>
11. Wang Z., et al. Temperature Control for MEMS Gyroscope with Thermoelectric Cooler. *2024 IEEE 19th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, Kyoto, Japan, 2024. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/NEMS60219.2024.10639902>
12. Wang Z., Zhou Y., Jiang B., Zhang J., Zhou T., Su Y. A Compact Temperature Controller for MEMS Vibratory Gyroscopes Using Thermoelectric Cooler. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2024. Vol. 71, No. 6. P. 3888–3894. DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3392184>
13. Анатичук Л. І., Вихор Л. М. Вплив електричних та теплових опорів контактів і комутацій на холодильний коефіцієнт термоелектричного модуля. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. № 3. С. 19–33.
14. Анатичук Л. І., Гаврилюк М. В., Лисько В. В. Обладнання для визначення параметрів термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. № 4. С. 58–68.
15. Анатичук Л. І., Лисько В. В. Методика визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. № 3. С. 73–85.
16. Дмитриченко М. Ф., Гутаревич Ю. Ф., Тріфонов Д. М., Сирота О. В. Застосування термоелектричних перетворювачів енергії для зменшення впливу природно-кліматичних факторів на технічну готовність транспортного засобу. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. № 3. С. 58–69.
17. Кириченко О. С. Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ : ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2023. Т. 34(73), № 1. С. 256–263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
18. Кириченко О. С., Білюк І. С., Шарейко Д. Ю., Фоменко А. М., Гаврилов С. О., Бугрім Л. І. Чисельне тривимірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ : ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2018. Т. 29(68), Ч. 1, № 6. С. 58–63.
19. Кириченко О. С. Вплив режиму та способу конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ : ДУІТ, 2025. Вип. 2(43). С. 5–19. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.01>
20. Кириченко О. С. Термоелектричні модулі з різними способами контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Київ : СХУ ім. В. Даля, 2023. № 1(277). С. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>
21. Kyrychenko O., Golubieva S., Morneva M. Modeling of Thermoelectric Modules with Thermal Stress Damping for Transport Electrical Equipment. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2023. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>
22. Горський П. В. Демпфування термомеханічних напружень як засіб підвищення циклічної стійкості термоелектричних перетворювачів енергії. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2023. № 4. С. 17–26.
23. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Пріступа С. В., Голубєва С. М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ : ДУІТ, 2024. Вип. 1(39). С. 69–82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
24. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Пріступа С. В., Голубєва С. М., Пастух О. В. Термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ : ДУІТ, 2023. Вип. 1(37). С. 201–213. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
25. Лобунець Ю. М. Оцінка характеристик ОТЕС з термоелектричними перетворювачами енергії. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2013. № 1. С. 62–67.
26. Кириченко О. С. Аналіз пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом для суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Київ : СХУ ім. В. Даля, 2025. № 2(288). С. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-37-48>

27. Анатичук Л. І. Термоелектричні перетворювачі енергії. Термоелементи. Елементна база термоелектрики: монографія. Т. 2 / Л. І. Анатичук; ред. Л. М. Вихор, О. Я. Лусте. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. 376 с.

28. Анатичук Л. І., Балазюк В. М., Лусте О. Я., Малишко В. В. Про підвищення циклічної стійкості термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. № 4. С. 71–75.

29. Wright D. N., et al. Optimising thermal management of MEMS element with thermoelectric-cooler. 2022 *IMAPS Nordic Conference on Microelectronics Packaging (NordPac)*, Gothenburg, Sweden, 2022. P. 1–6.

30. Nazir J., Vivek T., Jaisingh T. Temperature stabilization in fibre optic gyroscopes for high altitude aircraft. *Optik*. 2016. Vol. 127, Issue 20. P. 9701–9710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.03.083>

31. Ciminelli C., Dell'Olio F., Armenise M. N. High-Q Spiral Resonator for Optical Gyroscope Applications: Numerical and Experimental Investigation. *IEEE Photonics Journal*. 2012. Vol. 4, No. 5. P. 1844–1854. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2012.2218098>

Kyrychenko O.S., Klochkov Y.P., Melnyk V.Y., Kolomiets D.P., Vechurko O.M., Shevchenko V.I.
MODELING OF OPERATING CHARACTERISTICS OF A THERMOELECTRIC MODULE FOR FIBER-OPTIC GYROSCOPES IN MARINE NAVIGATION

Modern ship navigation systems require reliable heading instruments; accordingly, gyrocompasses are increasingly equipped with fiber-optic gyroscopes (FOGs). This type of gyroscope belongs to high-precision opto-electronic instruments capable of determining a vessel's heading independently of GPS and other navigational aids. FOGs are often fitted with Peltier thermoelectric modules (TEMs) to cool superluminescent diodes (SLDs) that generate the interference signal in the optical fiber light source. Operation under real marine conditions necessitates additional insulation of thermoelectric components against high humidity, salt fog, and vibration. In this work, a miniature thermoelectric module based on a modified epoxy compound was developed. Using the designed drawings, a three-dimensional model of the module was created and analyzed by numerical calculation. The results for the FOG TEM at currents from 0 to 2 A were used to construct performance characteristics in the form of functional plots of key quantities as well as two- and three-dimensional response surfaces. The analysis enabled us to assess the effectiveness of the developed miniature TEM for use in FOGs of shipboard navigation systems.

The study focused on a TEM with overall dimensions of $8 \times 8 \times 3$ mm, which places it in the class of miniature thermoelectric modules. The thermoelectric circuit comprised 21 P-N thermocouples, totaling 11 P-type and 11 N-type semiconductor legs, each measuring $0.82 \times 0.82 \times 1.5$ mm. Bismuth telluride (Bi_2Te_3) was used for both semiconductor types, with Seebeck coefficients $\alpha_p = +1.8 \times 10^{-4}$ V/K and $\alpha_n = -1.8 \times 10^{-4}$ V/K; copper served as the material for the interconnect plates, and Al_2O_3 ceramic for the package. The module interior was filled with a modified epoxy compound characterized by Young's modulus $E = 10$ GPa, Poisson's ratio $\nu = 0.2$, thermal conductivity $k = 1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, and coefficient of thermal expansion $\alpha_T = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. The numerical modeling accounted for coupled electrical, thermal, and mechanical processes. It was established that, at an operating current of 0.6–0.75 A, the temperature difference between the module's hot and cold sides is 20–27 °C. The study also discusses avenues for further optimization of TEM materials and structural features aimed at developing new generations of miniature cooling modules for fiber-optic gyroscopes in ship navigation systems.

Key words: modeling, thermoelectric module, operating characteristics, fiber-optic gyroscopes, marine navigation.

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 14.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Клименко В.В.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Разумова К.М.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Новальська Н.І.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Селіщев С.В.

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

Єрошенко О.Р.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ВПЛИВ ПАНДЕМІЇ COVID-19 НА ОРГАНІЗАЦІЮ І УПРАВЛІННЯ ГУМАНІТАРНИМ ЛАНЦЮГОМ ПОСТАВОК

Стаття досліджує проблеми гуманітарної логістики. Метою статті є поглиблене дослідження особливостей гуманітарної логістики через виокремлення її суб'єктів і об'єктів; розробка схем логістичного ланцюга поставки вантажів гуманітарної допомоги в Україну (у т.ч. і вакцин як особливого виду гуманітарної поставки), виокремлення чинників, що впливають на гуманітарний ланцюг; аналіз викликів і рішень, прийнятих під час пандемії COVID-19, щодо організації і управління гуманітарним ланцюгом поставок.

Визначено суб'єкти і об'єкти гуманітарної логістики, а також розроблено схеми логістичних ланцюгів поставки гуманітарних вантажів в цілому та вакцин як специфічного виду гуманітарної допомоги, що вимагає суворого дотримання умов температурного режиму.

Виявлено, що основними чинниками, що впливають на організацію гуманітарних ланцюгів поставок, є: ціни на товари гуманітарної допомоги та тарифи на їх транспортування; можливості донорського фінансування і виробничі потужності постачальників; наявність підготовленого персоналу та можливості транспортної інфраструктури.

Аналіз викликів пандемії COVID-19 показав неготовність суб'єктів гуманітарної логістики до оперативного і стійкого вирішення глобальної гуманітарної катастрофи. Але водночас пандемія позитивно вплинула на прийняття рішень по удосконаленню організації і управління гуманітарним ланцюгом поставок, підкресливши необхідність розробки і затвердження стратегічних планів реагування на гуманітарні загрози як на національному, так і на міжнародному рівнях; прийняття глобальних стандартів щодо товарів гуманітарної допомоги; використання механізмів приватно-публічного партнерства в організації гуманітарних ланцюгів постачання; координації діяльності всіх учасників логістичного ланцюга; впровадження сумісних ланцюгів постачання та спільних закупівель.

Ключові слова: гуманітарна логістика, пандемія COVID-19, вакцина, холодовий ланцюг, гуманітарний ланцюг постачання, перевезення.

Постановка проблеми. Пандемія COVID-19 стала однією з серйозних загроз 21 століття для усього світу, вплинувши не лише на сферу охорони здоров'я, а й спричинивши глобальні зміни в інших сферах, насамперед гуманітарній логістиці.

На початку пандемії важливо було організувати оперативне постачання медичного облад-

нання і ліків, а також товарів першої необхідності, а коли була винайдена вакцина, то через особливі умови її зберігання і перевезення, необхідно було удосконалювати ланцюги постачання гуманітарної допомоги.

Рішення щодо удосконалення організації гуманітарної логістики в умовах COVID-19 є акту-

альними і для нинішньої надзвичайної ситуації в Україні, що спричинена військовою агресією з боку росії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впливу пандемії COVID-19 на різні аспекти суспільного розвитку досліджувались як українськими, так і зарубіжними вченими. Зокрема, Мельник К. та Негода А. визначили основні аспекти, які вплинули на міжнародні логістичні операції під час спалаху пандемії COVID-19 та війни в Україні [1], звернувши увагу на те, що пандемія дозволила зробити ланцюги постачання більш стійкими, а також диверсифікувати ризики завдяки покращенню планування запасів і відмови від постачання з одного місця. Кобилух О., Гірна О. та Гаєва Л. здійснили порівняльний аналіз тенденцій на ринку транспортної логістики до та під час пандемії коронавірусу, виокремивши основні виклики з урахуванням особливостей українського ринку [2]. Михайлов Є., Водолазський О., Долбня Д. проаналізували світовий досвід щодо реалізації логістичних ланцюгів розподілу вакцин, окреслили основні проблеми доставки вакцин проти COVID-19, насамперед що стосуються створення дорогої охолоджувальної інфраструктури, а також використання спеціальних транспортних засобів і устаткування для перевезення і зберігання вакцин [3].

Ковач Г. та Сігала І. досліджують практику організації гуманітарного ланцюга постачання в цілому та особливості управління ланцюгами постачання медичних виробів та вакцин під час пандемії коронавірусної хвороби [4]. Томпсон Д. та Андерсон Р. на основі фактичних даних про розгортання пандемії COVID-19 в США аналізують проблеми в організації гуманітарного ланцюга постачань, підкреслюючи відмінність пандемій від інших катастроф [5].

Мета статті полягає в: 1) поглибленому дослідженні особливостей гуманітарної логістики через виокремлення її суб'єктів і об'єктів; 2) розробці схем логістичного ланцюга поставки вантажів гуманітарної допомоги в Україну (у т.ч. і вакцин як особливого виду гуманітарної поставки), виокремлення чинників, що впливають на гуманітарний ланцюг; 3) аналізі викликів і рішень, прийнятих під час пандемії COVID-19, щодо організації і управління гуманітарним ланцюгом поставок.

Виклад основного матеріалу. Гуманітарна логістика має на меті своєчасне і ефективне надання необхідної допомоги постраждалим, що знаходяться на межі гуманітарної катастрофи вна-

слідок аварій, катастроф, епідемій, стихійних лих, збройної агресії, і включає весь комплекс операцій з управління ланцюгом поставок вантажів гуманітарної допомоги.

Гуманітарна логістика включає певну сукупність об'єктів і суб'єктів (рис. 1). Закон України «Про гуманітарну допомогу» визначає таких суб'єктів ланцюга постачань гуманітарної допомоги, як:

- донори гуманітарної допомоги (юридичні особи, що надають гуманітарну допомогу);
- отримувачі гуманітарної допомоги (громадські об'єднання; неприбуткові державні та комунальні підприємства; Державна служба України з надзвичайних ситуацій; Товариство Червоного Хреста України; благодійні та релігійні організації; надавачі соціальних, медичних та реабілітаційних послуг; відокремлені підрозділи іноземних неурядових організацій та представництва міжнародних міжурядових організацій, дипломатичні представництва та консульські установи іноземних держав в Україні);
- набувачі гуманітарної допомоги (фізичні та юридичні особи, які потребують допомоги і яким вона безпосередньо надається) [6].

Водночас до вищезазначених суб'єктів слід додати також ті підприємства, які організовують перевезення гуманітарних вантажів (логістичні оператори) і безпосередньо їх виконують (перевізники), а також забезпечують зберігання таких вантажів (гуманітарні склади, логістичні розподільчі центри).

Об'єктами гуманітарної логістики виступають вантажі гуманітарної допомоги, які надаються донорами з мотивів гуманності у зв'язку із соціальною незахищеністю, матеріальною незабезпеченістю, скрутним фінансовим становищем, введенням воєнного або надзвичайного стану, виникненням надзвичайної ситуації або тяжкою хворобою конкретної фізичної особи, а також для підготовки до збройного захисту держави та її захисту у разі збройної агресії або збройного конфлікту [6]. Зокрема, уряд затвердив перелік категорій товарів, що визнаються гуманітарною допомогою без здійснення процедури визнання таких товарів гуманітарною допомогою у кожному конкретному випадку, на період воєнного стану [7]. Цей перелік включає товари, які задовольняють потреби їхніх отримувачів і не створюють загрози життю та здоров'ю людей, а також навколишньому середовищу, зокрема: продукти харчування, товари текстильної і легкої промисловості, будівельні товари, скло та посуд, верстати, машини та інструменти, побутову техніку, електричні товари

і енергетичне обладнання, апаратуру і вимірювальні прилади, певні види транспортних засобів та їх частини, медичні вироби і медико-санітарне обладнання, друковану продукцію, меблі тощо.

На рис. 2 представлено ланцюг поставки вантажів гуманітарної допомоги в Україну з-за кордону.

Особливим видом гуманітарної допомоги виступають вакцини. І специфіка логістичного ланцюга їхньої поставки полягає в необхідності виконання умов холодового ланцюга (рис. 2).

Слід зазначити, що на обсяги перевезення гуманітарної допомоги, її структуру та швидкість надання впливають різні чинники, які відображають попит і пропозицію гуманітарних вантажів, можливості і умови транспортних та складських операцій (рис. 3).

Глобальною загрозою 21 століття для життя людини стала пандемія COVID-19, з раптовою появою якої було пов'язано багато викликів для гуманітарної логістики. Ні система охорони



Рис. 1. Суб'єкти і об'єкти гуманітарної логістики

Джерело: складено автором на основі джерел [6; 7].



Рис. 2. Логістичний ланцюг поставки вантажів гуманітарної допомоги в Україну з-за кордону

Джерело: складено автором на основі джерел [3; 4; 6; 8].

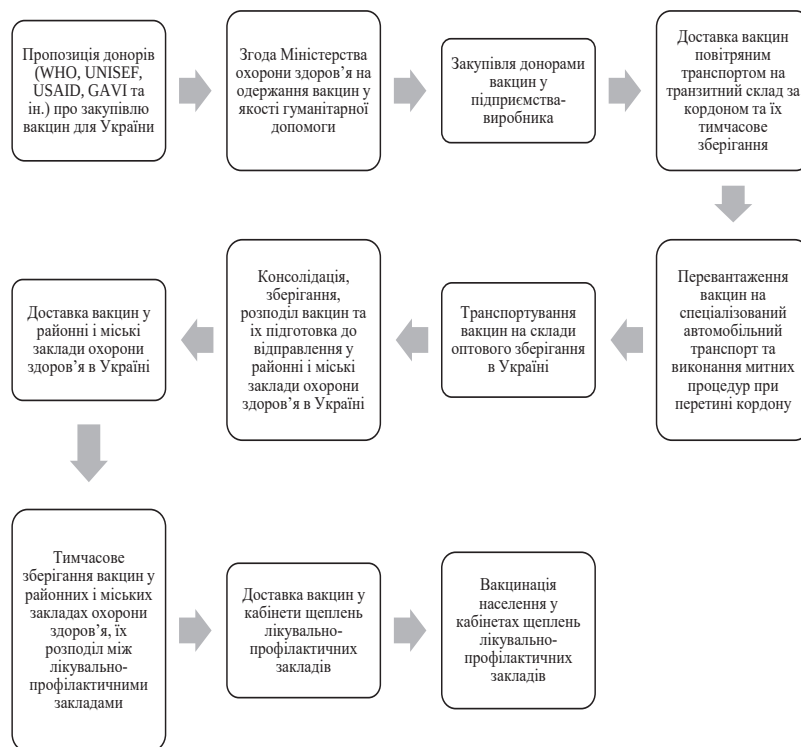


Рис. 3. Логістичний ланцюг поставки вакцин як гуманітарної допомоги в Україну

Джерело: складено автором на основі джерел [9; 10].

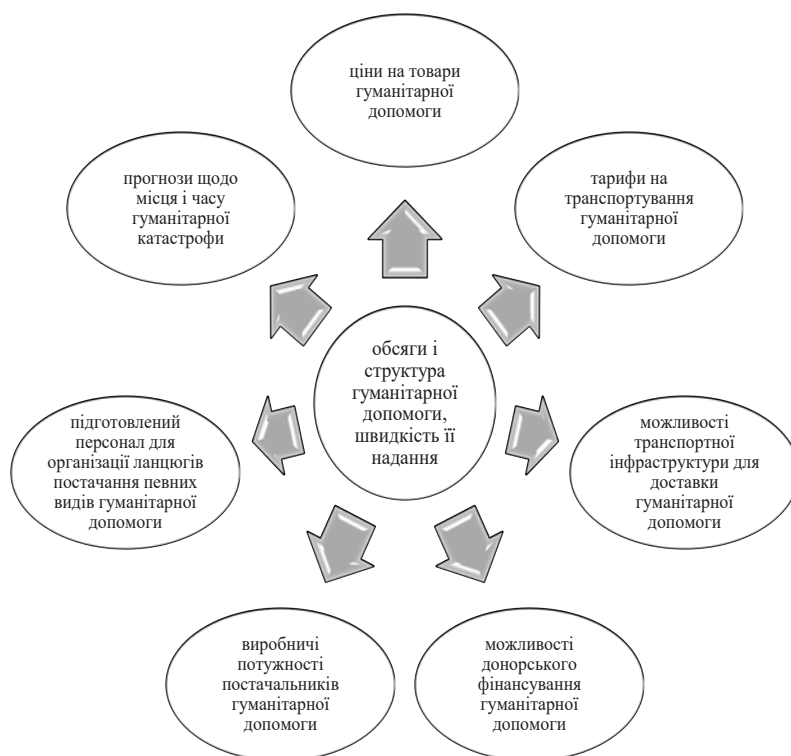


Рис. 4. Чинники, що впливають на ланцюги постачання вантажів гуманітарної допомоги

Джерело: складено автором на основі джерела [4; 11].

здоров'я, ні уряди, ні виробники, ні логістичні постачальники, ні населення не були готові до цієї загрози. Ситуація ускладнювалась глобальним характером коронавірусу, коли національні уряди не могли забезпечити вихід з кризи і надати належну допомогу всім, хто її потребував. Необхідна була координація їхніх дій на міжнародному рівні, розробка стратегічних планів реагування на гуманітарні загрози як на національному і на міжнародному рівнях, а також прийняття глобальних стандартів для медичних товарів гуманітарної допомоги, об'єднання зусиль державного і приватного секторів через укладання рамкових угод між урядами і постачальниками, впровадження механізмів приватно-публічного партнерства в організацію гуманітарних ланцюгів постачання [12]. Важливою є стандартизація не лише медичних засобів та обладнання, а й процесів, що забезпечують сумісність медичного обслуговування по всьому світу [4].

Давався в знаки брак запасів гуманітарної допомоги у вигляді засобів індивідуального захисту, ліків і медичних виробів, жорсткою була конкуренція за ресурси. Розміщення товарів гуманітарної допомоги у стратегічних місцях по всьому світу для створення страхових запасів виявилось недостатнім в таких умовах. Рішенням цьому стали спільні закупівлі і впровадження сумісних ланцюгів постачання [11]. Наприклад, країни ЄС організували свою співпрацю в рамках Програми rescEU, яка передбачає спільне реагування, зокрема, щодо резервування виробничих потужностей і транспорту для доставки гуманітарних вантажів, спільні закупівлі вакцин [13]. Спільне реагування дозволяє стабілізувати дефіцит, економити на масштабах, підвищувати ефективність ланцюга постачань медичних товарів шляхом стабілізації інформаційних потоків [4].

Ще одним успішним прикладом спільного реагування є ініціатива COVAX, яка координує закупівлі вакцин проти коронавірусу та іншого обладнання для їх введення [14].

Слід зазначити, що винайдені вакцини проти COVID-19 потребували особливих, більш суворих вимог щодо температурного режиму. Так, на початку використання вакцини Pfizer/BioNTech виробники наполягали на необхідності дотримання від -60°C до -80°C і лише за п'ять днів до самого використання дозволялося розміщувати вакцину у звичайних холодильних камерах [15]. Це вимагало забезпечення наявності у компаній-

перевізників відповідних транспортних засобів, здатних підтримувати ультранизьку температуру під час доставки вакцин, а оснащення складів для зберігання вакцини відповідним морозильним обладнанням. Як результат відповіді на пандемію, нині в Україні завершено спільний проєкт Міністерства охорони здоров'я та Світового банку «Екстрене реагування на COVID-19 та вакцинація в Україні». Зокрема, створено діючу сучасну систему зберігання та транспортування вакцин за умов «холодового ланцюга». Старе обладнання (холодильники та морозильні камери) замінено на сучасні холодові кімнати та холодильне обладнання, яке відповідає світовим стандартам. Також дооснащено автопарк фургонів-рефрижераторами [16].

Таким чином, пандемія відіграла важливу роль в удосконаленні гуманітарної логістики, запропонувавши рішення щодо підвищення гнучкості, оперативності, стійкості та адаптивності гуманітарного ланцюга постачань.

Висновки. Гуманітарна логістика спрямована на швидке реагування на загрози життю людей і включає певну сукупність суб'єктів, які надають гуманітарну допомогу, забезпечують її постачання та є її набувачами. До об'єктів гуманітарної логістики належать гуманітарні вантажі, що представлені товарами, які є життєво необхідними для постраждалих в результаті гуманітарної кризи (катастрофи).

Логістичний ланцюг поставки гуманітарної допомоги відрізняються від комерційних ланцюгів складом учасників і особливими умовами митних процедур і обліку. Логістичний ланцюг поставки вакцин як гуманітарної допомоги передбачає необхідність дотримання умов температурного режиму. Основними чинниками, що впливають на організацію гуманітарних ланцюгів поставок, виступають ціни на товари гуманітарної допомоги та тарифи на їх транспортування; можливості донорського фінансування і виробничі потужності постачальників, наявність підготовленого персоналу та можливості транспортної інфраструктури.

Аналіз викликів пандемії COVID-19 показав неготовність суб'єктів гуманітарної логістики до оперативного і стійкого вирішення глобальної гуманітарної катастрофи, проте водночас пандемія позитивно вплинула на прийняття рішень по удосконаленню організації і управління гуманітарним ланцюгом поставок. Пандемія підкреслила

необхідність розробки і затвердження стратегічних планів реагування на гуманітарні загрози як на національному, так і на міжнародному рівнях; прийняття глобальних стандартів щодо товарів гуманітарної допомоги; використання механізмів

приватно-публічного партнерства в організації гуманітарних ланцюгів постачання; координації діяльності всіх учасників логістичного ланцюга; впровадження сумісних ланцюгів постачання та спільних закупівель.

Список літератури:

1. Мельник К., Негода А. Вплив пандемії COVID-19 та війни в Україні на світову логістику. *Економіка та суспільство*. 2022. № 39. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-3>
2. Кобилюх О., Гірна О. та Гаєва Л. Ключові аспекти транспортної логістики в умовах пандемії COVID-19. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2020. Т. 31 (70). № 4. С. 117–122. URL: <https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-4-21>
3. Михайлов Є., Водолазський О., Долбня Д. Проблеми логістики розподілу імунобіологічних препаратів в епоху пандемії. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2021. № 4 (268) С. 76–81. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-76-81>
4. Kovacs G., Sigala I. Lessons learned from humanitarian logistics to manage supply chain disruptions. *Journal of Supply Chain Management*. 2021. Vol. 57, Issue 1. P. 41–49. URL: <https://doi.org/10.1111/jscm.12253>
5. Thompson D., Anderson R. The COVID-19 response: considerations for future humanitarian supply chain and logistics management research. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 157–175. URL: <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-01-2021-0006>
6. Про гуманітарну допомогу: Закон України від 22 жовтня 1999 року № 1192-XIV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1192-14#Text>
7. Про затвердження переліку категорій товарів, що визнаються гуманітарною допомогою без здійснення процедури визнання таких товарів гуманітарною допомогою у кожному конкретному випадку, на період воєнного стану та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України з питань гуманітарної допомоги: Постанова Кабінету Міністрів України від 07 березня 2022 року № 224. URL: <https://www.kmu.gov.ua/pras/pro-zatverdzhennya-pereliku-kategorij-tovariv-shcho-viznayutsya-gumanitarnoyu-dopomogoyu-bez-zdiysnennya-proceduri-viznannya-takih-tovariv-gumanitarnoyu-dopomogoyu-u-kozhnomu-224>
8. Порядок пропуску та обліку гуманітарної допомоги в умовах воєнного стану, затверджений Постановою КМУ від 5 вересня 2023 р. № 953. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/953-2023-%D0%BF#Text>
9. Порядок забезпечення належних умов зберігання, транспортування, приймання та обліку вакцин, анатоксинів та алергену туберкульозного в Україні, затверджений наказом Міністерства охорони здоров'я України від 16.09.2011 № 595. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1166-11#Text>
10. Клименко В.В., Єрошенко О.Р., Лозова Г.М., Клименко І.В. Сучасні аспекти управління перевезенням вакцин в системі холодового ланцюга. *Актуальні проблеми розвитку економіки регіону*. 2025. Вип. 21. Т. 1. С. 248–259. URL: <https://doi.org/10.15330/apred.1.21.248-259>
11. Kumar P., Kumar Singh R., Shahgholian A. Learnings from COVID-19 for managing humanitarian supply chains: systematic literature review and future research directions. *Annals of Operations Research*. 2022. Vol. 335. P. 899–935. URL: <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04753-w>
12. A world at disorder. Annual report on global preparedness for health emergencies: Global Preparedness Monitoring Board. 2020. URL: https://www.gpmb.org/docs/librariesprovider17/default-document-library/annual-reports/gpmb-2020-annualreport-en.pdf?sfvrsn=bd1b8933_36
13. rescEU: European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations. URL: https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/what/civil-protection/resceu_en
14. COVAX: Working for global equitable access to COVID-19 vaccines. URL: <https://doi.org/10.22141/2312-413X.9.2.2021.236218>
15. Чернишова Л., Чернишов А. Порівняльна характеристика вакцин проти COVID-19. *Актуальна інфектологія*. 2021. Т.9. № 2. С. 5–9. URL: <https://doi.org/10.22141/2312-413X.9.2.2021.236218>
16. Сучасна система зберігання вакцин за умов «холодового ланцюга» та посилення лабораторного потенціалу на рівні регіонів: національний портал з імунізації. URL: <https://vaccine.org.ua/2025/03/31/ekstrene-reaguvannya-na-covid/>

Klymenko V.V., Razumova K.M., Novalska N.I., Selishchev S.V., Yeroshenko O.R. IMPACT OF THE COVID-19 PANDEMIC ON THE ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF THE HUMANITARIAN SUPPLY CHAIN

Article deals with the problems of humanitarian logistics. The purpose of the article is: in-depth study of the peculiarities of humanitarian logistics due to determining its actors and objects; development of logistics

chain of humanitarian aid cargo supply into Ukraine (including vaccines as specific type of humanitarian delivery), determining factors which effect humanitarian chain; analysis of challenges and solutions, making during COVID-19 pandemic, on the organization and management of humanitarian supply chain.

The actors and objects of humanitarian logistics have been determined, as well as, the models of logistics chain of humanitarian aid cargo supply as a whole and for vaccines as specific type of humanitarian aid, which requires strict implementation of temperature mode, have been developed.

In was found that main factors, effecting the organization of humanitarian supply chain, are the following: prices for humanitarian aid goods and tariffs for their transportation; donor financing opportunities and productive capacity of suppliers; availability of specially trained personnel and appropriate transport infrastructure.

Analysis of COVID-19 pandemic challenges showed unreadiness of the humanitarian logistics' actors to operative and stable solution of the global humanitarian catastrophe. However, pandemic positively influenced the decision-making on improving humanitarian supply chain, underlining necessity of development and approval of strategic plans for response to humanitarian threats at national and international levels; adoption of global standards on humanitarian aid goods; use of private-public partnership mechanisms in organization of humanitarian supply chain; coordination of the actions of all logistics chain's actors; introduction of and interoperable supply chain and joint procurement.

Key words: humanitarian logistics, COVID-19 pandemic, vaccine, cold chain, humanitarian supply chain, transportation.

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 16.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Korobko A.I.

Kharkiv National Automobile and Highway University

Semenov I.V.

Kharkiv National Automobile and Highway University,

Kharkiv branch of the State Scientific Organization «L. Pohorilyi Ukrainian Scientific Research Institute of Forecasting and Testing of Machinery and Technologies»

ADAPTATION OF ALL-WHEEL DRIVE WHEELED TRANSPORT AND TRACTION VEHICLES TO NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS

The article develops a methodology for adapting all-wheel drive vehicles to natural and climatic conditions. To achieve this goal, the following tasks have been solved: the conditions that the longitudinal base and horizontal coordinate of the centre of mass of a multi-axle wheeled tractor with a given operating weight should meet are determined; the balance of the train's capacities in low and high mountainous areas is determined; the methodology for increasing the manoeuvrability of an all-wheel drive vehicle depending on the traction properties of the propulsion systems is substantiated. All-wheel drive vehicles are operated on roads of different quality, and in some cases off-road. It is difficult to classify and quantify all the variety of road conditions, especially when you take into account that, depending on the season and specific regional conditions, the complex interaction of similar roads when a vehicle is driving can vary. The wheel overload of an 8-axle wheel tractor with an operating weight of 120 kN does not exceed 20% when the centre of mass is shifted forward by 0.38 m. When operating this tractor with a loaded trailer weighing 10 tonnes in high mountainous terrain, its tractive power is reduced by 6.0% compared to operation in lowland terrain. When an all-wheel drive tractor with a loaded trailer is operating in high mountainous terrain, its tractive power is reduced by 6.0% compared to lowland terrain. One of the ways to increase the manoeuvrability of wheeled all-wheel drive vehicles may be to reduce their longitudinal base. At the same time, it should be noted that with an increase in the turning speed and a decrease in wheel grip of shortened vehicles, the increase in their manoeuvrability is not significant.

Key words: traction vehicle, all-wheel drive vehicle, centre of mass, longitudinal base, manoeuvrability, power balance, traction properties, natural and climatic conditions.

Formulation of the problem. All-wheel drive wheeled transport and traction vehicles (AWTTV) are designed to perform transport work in particularly difficult climatic conditions [1]. Usually, these machines are operated under different climatic and road conditions with instability of loading modes of operation. It is known [2] that atmospheric instability is significantly influenced by four climate-related factors: humidity, heat supply, thermal conditions of the cold period, and continental climate [3]. The operation of AWTTVs is possible on roads in low and high mountainous areas under different atmospheric pressures, which leads to instability in the values of its traction and power indicators [4].

Analysis of recent research and publications. All-wheel drive vehicles are operated on roads of varying quality, and in some cases off-road. It is difficult to classify and quantify all the variety of road condi-

tions, especially if we take into account that, depending on the season and specific regional conditions, the complex interaction of similar roads when a vehicle is driving may vary. Therefore, to assess the road and climatic conditions of AWTTVs, the following approach has become widespread: the overall assessment of the complexity of the operating conditions is qualitative; quantitative assessment is given only by individual indicators that characterise a particular property of the road, a factor of road and climatic conditions [5, 6]. The adaptation of AWTTVs to natural and climatic conditions is assessed on the roads:

- dirt and forest roads during the off-road period;
- broken dirt roads, in dry and sandy terrain;
- natural dirt roads, virgin steppe, marshy soils.

The level of cross-country ability of AWTTVs is characterised by a set of the following, largely inter-related, features [6, 7]:

– the number of driving axles or wheel formula – two-axle (4x4), three-axle (6x6), four-axle (8x8) and multi-axle (10x10, 12x12, etc.) vehicles and road trains with active semi-trailers

– conditional average ground pressure (kPa) created by the vehicle's engines with a full load, which is equal to the ratio of the full load from the wheels of the vehicle to the projection area of the overall dimensions of all tyres on the bearing surface;

– even distribution of the AWTTV gross weight along the axles, which is close to optimal for off-road vehicles, as it ensures less rutting and reduced driving resistance;

– to reduce driving resistance on bad roads and off-road, AWTTVs in a road train must have the same track and tyre pitch on the tractor and trailer when the tractor weight exceeds the trailer weight.

In Ukraine, the most popular all-wheel drive vehicles are classical and special-purpose (Fig. 1).



Fig. 1. Four-wheel drive vehicles: a – KrAZ-6446 Burlak truck tractor; b – KrAZ-6511C6 dump truck

Task statement. The purpose of the article is to develop a methodology for adapting all-wheel drive vehicles to natural and climatic conditions. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

– to determine the conditions that the longitudinal base and horizontal coordinate of the centre of mass of a multi-axle wheeled tractor with a given operating weight must meet;

– to determine the balance of road train capacities in lowland and highland areas;

– to substantiate the methodology for increasing the manoeuvrability of an all-wheel drive vehicle depending on the traction properties of the propulsion systems.

Outline of the main material of the study. Determination of the conditions that must be met for the longitudinal base and horizontal coordinate of the centre of mass of a multi-axle wheeled tractor with a given operating weight. Determine the conditions that the longitudinal base and horizontal coordinate of the centre of mass of a multi-axle wheeled tractor with an operating weight of 120 kN must meet so that the overload of the wheels during continuous operation does not exceed 20%, and during the nominal

mode with a hook pulling force $P_{h,l} = 50$ kN, the load of the wheels is distributed equally.

Tractor design features: individual suspension, reduced to the axles of the support wheels, stiffness is constant and the same for all wheels. All wheels are drive wheels, the set height is constant. The height of the coupling point is $h_h = 0.8$ m. The design scheme of the tractor (Fig. 2), given the known kinematic parameters $l_n, x_g, x_i, h, h_h, a, L$, allows us to assess its loading modes.

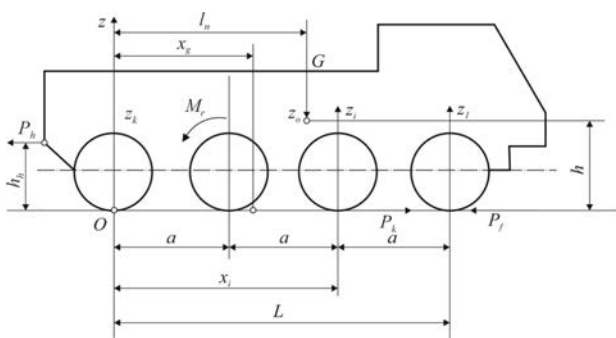


Fig. 2. Design scheme of a multi-axle wheel tractor

According to this scheme, when the number of support wheels is k , the distribution of reactions z_i of the contact of the tractor's support wheel with the road is estimated:

$$\left. \begin{aligned} z_a &= \sum_{i=1}^k z_i / k; \\ \beta &= \frac{z_k - z_a}{z_a}; \quad z_i = z_1 + \Delta z(i-1); \\ \Delta z &= (z_k - z_1) / (k-1); \quad x_i = a(k-i) \end{aligned} \right\} : \quad (1)$$

From the conditions for determining the centre of pressure of the wheels x_g on the ground, taking into account the dependencies (1), with $a = L / (k-1)$, we have

$$x_g = L \left[\frac{k}{k-1} - z_1 \frac{(k+1)}{2(k-1)z_a} - \frac{(z_k - z_1)(k+1)}{3z_k(k-1)} \right]. \quad (2)$$

Since

$$z_a = \sum_{i=1}^k z_i / k = (z_1 + z_k) / 2; \quad z_k / z_a = 1 + \beta; \quad z_1 / z_a = 1 - \beta$$

dependence (2) is written in the form

$$x_g = \frac{L}{2} \left(1 - \frac{\beta}{3} \cdot \frac{k+1}{k-1} \right). \quad (3)$$

Thus, in order to avoid overloading the outer wheels, the overload coefficient should not exceed $-0.2 \leq \beta \leq +0.2$.

When operating with the maximum hook pull, the overload of the rear wheel must satisfy the condition ($\beta \leq 0.2$)

$$x_g \geq \frac{L}{2} \left[1 - \frac{1}{15} \left(\frac{k+1}{k-1} \right) \right]. \quad (4)$$

When working without hook traction, the front wheel will be overloaded ($\beta \geq -0,2$)

$$x_g \leq \frac{L}{2} \left[1 + \frac{1}{15} \left(\frac{k+1}{k-1} \right) \right]. \quad (5)$$

Given the operating weight of the tractor G , the rolling resistance coefficient f at the dynamic wheel radius r_d , the rolling resistance moment is written as

$$M_r = fGr_d.$$

Neglecting the air resistance, from the equation of moments of acting forces we obtain

$$x_g = (Gl_n - M_r - P_h h_h) / G \quad (6)$$

keeping in mind that $x_o = G$.

At the largest value of the traction force on the hook, from the equation of force projections on the x -axis, given that the largest tangential force P_h of traction on the clutch $P_h = \varphi G$, we obtain

$$P_{h \max} = P_h - P_f = (\varphi - f)G. \quad (7)$$

Substituting (7) into (4), the overload of the rear wheel during the operation of the tractor with the maximum traction force on the hook is estimated by inequality

$$\frac{Gl_n - M_o - G(\varphi - f)h_h}{G} \geq \frac{L}{2} \left[1 - \frac{1}{15} \left(\frac{k+1}{k-1} \right) \right], \quad (8)$$

If $P_h = 0$, condition (5) will take the form

$$\frac{Gl_n - M_r}{G} \leq \frac{L}{2} \left[1 - \frac{1}{15} \left(\frac{k+1}{k-1} \right) \right]. \quad (9)$$

Comparing (9) and (8), we obtain the inequality

$$(\varphi - f)h_h \leq \frac{L}{15} \cdot \frac{k+1}{k-1}, \quad (10)$$

from where

$$L \geq \frac{15(\varphi - f)h_h(k-1)}{(k+1)}. \quad (11)$$

At $h_h = 0,8$ m; $\varphi = 0,7$; $f = 0,1$ we obtain

$$L \geq 7,2 \frac{k-1}{k+2}. \quad (12)$$

With the number of wheels $K=8$, we have $L > 0,77$ m; $K=6-L > 5,15$ m.

At the value of the tractor base that satisfies condition (12), we have the coordinates of the centre of mass at the dynamic radius and wheel $r_d = 0,5$ m

$$L \left(0,5 - 0,0333 \frac{k+1}{k-1} \right) + 0,53 \leq l_n \leq L \left(0,5 + 0,0333 \frac{k+1}{k-1} \right) + 0,05.$$

Consequently, at ,

$$K = 8 - 0,521L + 0,53 \leq l_n \leq 0,621L + 0,05,$$

$$K = 6 - 0,453L + 0,53 \leq l_n \leq 0,547L + 0,05.$$

The uniform distribution of loads over the wheels corresponds to $\beta = 0$ or $x_g = L/2$ according to (1). Therefore, from equation (5), when $P_h = P_{h,n}$, we obtain

$$l_n = \frac{L}{2} + \frac{P_{h,n}h_h + M_r}{G}. \quad (13)$$

Equation (13) shows that for a uniform distribution of loads over the wheels during the nominal operating mode, regardless of the support base and the number of wheels, the centre of mass of the tractor must be shifted forward from the average surface by

$$x = l_n - \frac{L}{2} = (P_{h,n}h_h + M_r) / G = \frac{50 \cdot 0,8}{120} + 0,05 = 0,38 \text{ m}.$$

Thus, the wheel overload of an 8-axle tractor with an operating weight of 120 kN will not exceed 20% when the centre of mass is shifted forward by 0.38 m.

Determination of the balance of road train capacities in lowland and highland areas. Determine the power balance of a road train in low and high mountainous terrain under the following conditions: a 15 t all-wheel drive tractor with a 10 t trailer is moving on roads of the first category (off-road) at a speed of 10 km/h. Calculate the power balance of the road train for two cases of movement on the terrain:

- lowland at an atmospheric pressure of 101.325 kPa and an air temperature of +6°C;
- highlands at an atmospheric pressure of 75.99 kPa and an air temperature of -15°C.

Wheel adhesion coefficient $\varphi = 0.7$; tractor transmission efficiency $\eta_T = 0.92$, tractor cross-sectional area 7 m², streamlining factor $C_x = 0.7$. The wheel shape of the tractor is 6x4 with 10 tyres of size 9.00 R20.

The power balance of the road train coming from the engine to the transmission is written in the form:

$$N_p = P_f v + (G + Q) v \sin \alpha + P_w + P_k \delta v / (1 - \delta), \quad (14)$$

where P_f is the force of resistance to rolling of the wheels of a road train on the road; v is the speed of the road train; G , Q is the gross weight of the tractor and trailer; α is the angle of the road slope; P_k , δ is the total tangential traction force of the drive wheels and their slip coefficient; P_w is the air resistance force.

The first two components of equation (14) are the power consumed to overcome the total road resistance:

$$P_f = f_v (G + Q),$$

where the coefficient f_v takes into account the rolling speed of the wheels $f_v = f(1 + 2,5 \cdot 10^{-4} v^2) = 0,0285$.

The slopes on the roads of the first category do not exceed 30% [7], so the total coefficient of road resistance, assuming $\tan \alpha = \sin \alpha = \alpha$; $\cos \alpha = 1$, is deter-

mined by $\psi = f_v \cos \alpha + \sin \alpha = 0,0586$. The power consumed to overcome the path resistance is $\psi(P_f + G \sin \alpha) = \psi \nu(G + Q) = 400$ kW.

The tangential traction force from the traction balance equation is estimated by Eq:

$$P_k = \psi(G + Q) + P_w, \quad (15)$$

where is the air resistance pressure force

$$P_w = C'_x \rho F v^2 / 2, \quad (16)$$

C'_x is the coefficient of resistance to flow of the road train, which is 10% higher than the same value for the tractor, i.e. $G'_k = 0,77$; ρ is the air density when the road train is operating in lowland areas 1.37 kg/m³, in highland areas 0.89 kg/m³.

The force P_w and power $N_w = P_w \nu$ consumed to overcome this resistance when operating a road train in lowland terrain is $P_w = 2849$ N, $N_w = 79.1$ kW; in highland terrain – $P_w = 1851$ N, $N_w = 51.4$ kW. The tangential traction force of all drive wheels according to Equation (15) in the first case is $P_{k1} = 17.2$ – 103 N, in the second case $P_{k2} = 16.2$ – 103 N. When the tractor wheels slip $\delta = 5.0$ %, the power consumption for sliding in the first case is $N_\delta = 2.48$ kW, in the second case – 2.24 kW.

The power supplied from the engine to the transmission goes to the transmission of the tractor vehicle, calculated by dependence (14), in the first case $N_{pt} = 523.3$ kW, in the second – 493.1 kW.

Thus, the operation of an all-wheel drive tractor with a loaded trailer in high mountainous terrain reduces its traction power by 6.0% compared to operation in lowland terrain.

Substantiation of a methodology for increasing the manoeuvrability of an all-wheel drive vehicle depending on the traction properties of the propulsion systems. We substantiate a methodology for increasing the manoeuvrability of an all-wheel drive vehicle with a wheel formula 8x8 and a longitudinal base $L = 4.4$ m at a turning speed of 2.5 m/s to 3.1 m/s, depending on the traction properties of the propulsion systems.

Manoeuvrability in conjunction with controllability is one of the most important operational properties of wheeled vehicles that determine the efficiency of use and traffic safety [8, 9]. The proposed turning scheme of a vehicle with a wheel formula 8x8 is aimed at reducing the longitudinal axis to make a turn with a minimum radius (Fig. 3).

The turning radius R of the vehicle is determined by the formula

$$R = L \cdot \operatorname{ctg} \varphi, \quad (17)$$

where L is the longitudinal base of the vehicle, φ is the average steering angle of the steered wheels.

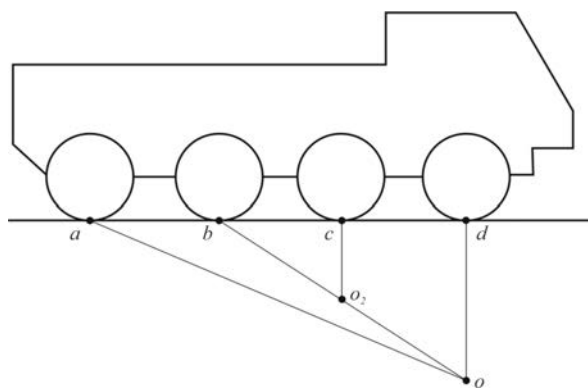


Fig. 3. Turning pattern with a minimum turning radius for an all-wheel drive vehicle with a reduced longitudinal base

When manoeuvring while driving or in a stationary state with $R > R_{min}$, the steered wheels of the first and second drive axles turn at certain angles, providing the required vehicle trajectory. Moreover, the steering trapezoids of the axles ensure that the steered wheels do not slip within the same side (point o is the common centre of rotation). The longitudinal base of the vehicle is ad , and the turning radius is od (Fig. 3).

It is proposed [8] to simultaneously lift the first (point d) and fourth (point a) drive axles. In this case, the longitudinal base is determined by the segment bc , the centre of rotation of the vehicle moves to the point o_2 with a turning radius $R = o_2c$. The main trajectory of the vehicle when performing one of the most commonly used manoeuvring schemes (90° or 180° turn, overtaking or overtaking) consists of three sections: the input, circular and output.

The circular section of the main trajectory is an arc of a circle with a radius R_o min, which reduces the central angle φ_k : $R_{omin} = L / \operatorname{tg} \varphi_{max}$. Transition sections of the main trajectory (input and output) are curves described by the parametric equations:

$$\left. \begin{aligned} x_o &= \frac{1}{k_n} \int_{\varphi_o}^{\varphi_{max}} \cos \left(-\frac{l_n \cos \varphi_o}{k_n L} \right) d\varphi_o; \\ y_o &= \frac{1}{k_n} \int_{\varphi_o}^{\varphi_{max}} \sin \left(-\frac{l_n \cos \varphi_o}{k_n L} \right) d\varphi_o \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

where φ_o is the angle of inclination of the longitudinal axis of the vehicle to the abscissa axis; $k_n = \dot{\varphi} / v_o$ is the turning mode parameter; $\dot{\varphi}$ is steering wheel turning speed; v_o is the vehicle turning speed.

The minimum value of the mode parameter depends on the longitudinal base L , the turning speed v_o and the coefficient of adhesion of the wheels to the ground φ_c (Fig. 4, Fig. 5):

$$k_n \leq \arctg \frac{q \varphi_c}{v_o^2} \cdot \frac{L}{v_o \cdot t}. \quad (19)$$

The analysis of these dependencies allows us to conclude that one of the ways to increase the manoeuvrability of all-wheel drive wheeled vehicles can be to reduce their longitudinal base. At the same time, it should be noted that with an increase in turning speed and a decrease in wheel adhesion to the ground, the efficiency of shortened vehicles does not significantly increase their manoeuvrability.

When designing all-wheel drive transport and traction vehicles, in particular a heavy military truck with a 6x6 wheel formula [9], the effectiveness of modelling its dynamics in relation to kinematic parameters has been proven.

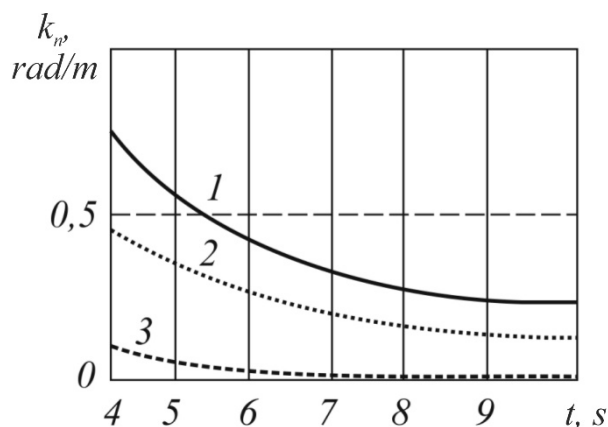


Fig. 4. Dependence of the mode parameter k_n on the time of turning the angle of different turning speeds: 1 – $v_o=1,8$ m/s; 2 – $v_o=2,2$ m/s; 3 – $v_o=4,2$ m/s

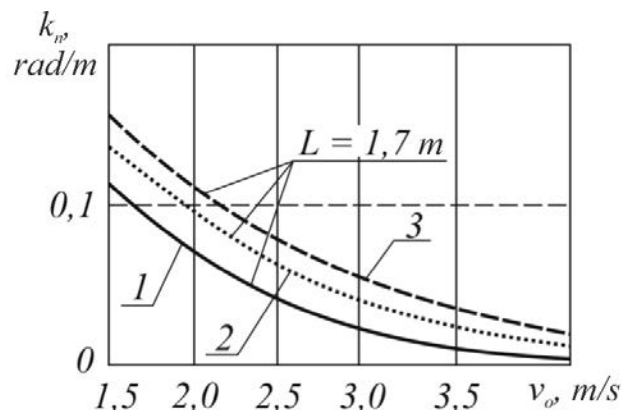


Fig. 5. Dependence of the mode parameter k_n on the turning speed v_o within 10 sec for: 1 – $\varphi_c=0,4$; 2 – $\varphi_c=0,6$; 3 – $\varphi_c=0,8$

Conclusions. All-wheel-drive wheeled transport and traction machines are designed to perform transport work in particularly difficult natural and climatic conditions. The wheel overload of an 8-axle wheel tractor with an operating weight of 120 kN does not exceed 20% when the centre of mass is shifted forward by 0.38 m. When operating this tractor with a loaded trailer weighing 10 tonnes in high mountainous terrain, its tractive power is reduced by 6.0% compared to operation in lowland terrain.

One of the ways to increase the manoeuvrability of wheeled all-wheel drive vehicles is to reduce their longitudinal base. At the same time, it should be noted that with an increase in turning speed and a decrease in wheel grip, shortened vehicles do not significantly increase their manoeuvrability.

Bibliography:

1. Автомобіль вантажний. Сучасні конструкції / А.Т. Лебедев, В.Д. Мигаль, І.О. Шевченко, М.Л. Шуляк; за ред. проф. А.Т. Лебедева. Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. 369 с.
2. Зінько Р.В., Крайник Л.В., Горбай О.З. Основи конструктивного синтезу та динаміка спеціальних автомобілів і технологічних машин: монографія. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2019. 256 с.
3. Майданович Н. Агросфера України в умовах кліматичних змін. *Техніка і технології АПК*. 2021. № 1 (118). С. 25–29.
4. Мандрика В.Р., Мандрика А.В. Підвищення керованості багатовісних колісних транспортних засобів. *Вісник ХТУ «ХП» «Автомобіле та тракторобудування»*. 2005. 10. С. 107–111.
5. Кравчук В., Шустік Л., Нілова Н., Степченко С., Супрун В. Синтез техніко-технологічних рішень для розкриття природних ресурсів агросфери. *Техніка і технології АПК*. 2018. № 7 (106). С. 17–20.
6. Асуїа, Marcelo Andrés, Gustavo Simão Rodrigues, Rafael Vitor Guerra Queiroz, and Elias Dias Rossi Lopes. Modeling and dynamic analysis of a 6 x 6 heavy military truck by adaptive model predictive control with application to NATO lane change test course. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 234, no. 13 (June 10, 2020): 3128–44. <http://dx.doi.org/10.1177/0954407020924156>.
7. Hasagasoglu S., Kilicaslan K., Atabay O. et al. Vehicle dynamics analysis of a heavy-duty commercial vehicle by using multibody simulation methods. *Int J Adv Manuf Technol*. 60. 2012. P. 825–839. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3588-8>.
8. Heisler H. *Advanced Vehicle Technology*. 2nd Edition. Imprint: Butterworth-Heinemann. 2002. 656 p.

**Коробко А.І., Семенов І.В. АДАПТАЦІЯ ПОВНОПРИВІДНИХ КОЛІСНИХ
ТРАНСПОРТНО-ТЯГОВИХ МАШИН ДО ПРИРОДНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ**

У статті розроблено методику адаптації повнопривідних автомобілів до природно-кліматичних умов. Для досягнення поставленої мети вирішено наступні задачі: визначено умови, яким повинна відповідати поздовжня база і горизонтальна координата центру мас багатоопорного колісного тягача з заданою експлуатаційною масою; визначено баланс потужностей автопоїзду в низинній та високогірній місцевості; обґрунтовано методику підвищення маневреності повнопривідного транспортного засобу у залежності від зчпних властивостей рушіїв. Повнопривідні автомобілі експлуатуються на дорогах різної якості, а у ряді випадків по бездоріжжю. Класифікувати й кількісно оцінити усе різноманіття дорожніх умов складно, особливо якщо прийняти до уваги, що у залежності від сезону та специфічних умов регіону комплексна взаємодія однотипних доріг при русі автомобіля може бути різною. Перевантаження коліс 8-ми опорного колісного тягача з експлуатаційною вагою 120 кН не перевищує 20% при зміщенні центру мас вперед на 0,38 м. При роботі даного тягача із завантаженим причепом масою 10 т на високогірній місцевості його тягова потужність знижується на 6,0% у порівнянні з роботою в низинній місцевості. При роботі повнопривідного колісного тягача з завантаженим причепом на високогірній місцевості знижується його тягова потужність на 6,0% у порівнянні із роботою на низинній місцевості. Одним зі шляхів підвищення маневреності колісних повнопривідних транспортних машин може бути зменшення їх поздовжньої бази. Одночасно необхідно відмітити, що з підвищенням швидкості повороту і зниження зчеплення коліс з ґрунтом укорочених транспортних машин підвищення їх маневреності не суттєве.

Ключові слова: тягова машина, повнопривідна машина, центр мас, поздовжня база, маневреність, баланс потужності, зчпні властивості, природно-кліматичні умови.

Дата надходження статті: 17.09.2025

Дата прийняття статті: 03.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Лукін Є.О.

Херсонський морський торговельний порт

ПОРТОЦЕНТРИЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ РИЗИКІВ: СКООРДИНОВАНИЙ ПІДХІД SOP- ТА ESS-ОПТИМІЗАЦІЇ

У статті досліджуються підходи зміцнення енергостійкості порткових систем у контексті зростання кліматичних ризиків шляхом спільної оптимізації систем енергетичного накопичення (ESS) і гнучких сортувальників-інтерфейсів (SOP). Порти, які знаходяться в центрі міжнародної логістики, нині зіткнулися з усе більш серйозними проблемами від втраченого аспекту відновлюваної енергії, нестабільності зовнішньої енергосистеми та високою критичністю для безперебійного живлення. У роботі подано модель управління плануванням енергостійкості портів із метою забезпечення безперебійної роботи критичних навантажень під час аварійних та екстремальних ситуацій. На основі огляду сучасних наукових підходів розроблено структуру двоетапної оптимізації конфігурацій ESS-SOP, яка дає змогу виконувати узгоджене планування як ємності накопичувачів, так і логіки реагування на несправності. Введено критерії економічної раціональності, оперативної готовності та рівня забезпечення навантажень. Обумовлено моделювання із врахуванням стохастичної природи та вітрової, і сонячної генерації, що надзвичайно важливо для порткових PIMES (портково-інтегрованих мультиенергетичних систем). Показано, що спільне планування ESS і SOP дозволяє значним чином зменшити втрати навантаження, забезпечити швидке відновлення роботи критичних об'єктів та скоротити витрати реагування на аварію майже на 45%. Додатково обґрунтовано доцільність заходів щодо впровадження комплексних підходів до підвищення надійності енергозабезпечення портів, що поєднують технічне планування з елементами стратегічного управління. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до безпеки, енергоефективності та адаптивності портової інфраструктури в умовах кліматичних викликів та загроз порушення глобальних ланцюгів постачання. Практичне значення результатів дослідження полягає в тому, що запропонована модель може бути використана при плануванні модернізації портової інфраструктури, а також для підтримки прийняття рішень операторами енергосистем у кризових умовах. Її адаптивність до змін енергетичного навантаження й погодних умов дозволяє забезпечити стабільну роботу ключових порткових об'єктів у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: портова енергетична стійкість, мультиенергетичні системи, накопичувачі енергії (ESS), м'які точки підключення (SOP), робастна оптимізація, критичні навантаження, адаптація до кліматичних ризиків, відновлювана енергетика, пріоритезація навантажень, планування енергосистем.

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростаючої частоти та інтенсивності кліматичних екстремальних подій, порти постають перед викликом забезпечення безперервного енергопостачання критичних інфраструктур. Ця стаття спрямована на дослідження стратегічного підходу до підвищення енергетичної стійкості портів шляхом спільного планування та оптимізації конфігурації м'яких точок підключення (Soft Open Points, SOP) та систем накопичення енергії (Energy Storage Systems, ESS).

Зважаючи на складну структуру порткових енергосистем та залежність від відновлюваних джерел енергії, модель передбачає дворівневу оптимізацію. Перший рівень зосереджується на передава-

рйному розміщенні потужностей SOP і ESS, що враховує їхню здатність до формування енергетичного резерву. Другий рівень орієнтований на післяаварійну адаптацію: перерозподіл навантаження відповідно до його критичності, оперативне перепідключення SOP та динамічне керування зарядом/розрядом ESS для підтримки роботи пріоритетних споживачів. Такий підхід забезпечує досягнення 100% безперервної роботи найкритичніших навантажень (рівень 1) навіть за умов повного відключення від зовнішнього джерела живлення. Ключовими аспектами запропонованої концепції є: i) інтеграція ризик-орієнтованого підходу до енергетичного планування порту, ii) використання методу двоетапної робастної оптимізації з ураху-

ванням невизначеності генерації вітрової та сонячної енергії, iii) адаптація управлінських стратегій до сценаріїв кліматичних загроз.

З практичної точки зору, результати моделювання на прикладі системи PIMES порту Нінбо-Чжоушань демонструють істотне зниження втрат електропостачання та підвищення стійкості. Порівняно з незалежним впровадженням ESS або SOP, спільна оптимізація знижує вартість втрат навантаження на 45.76% та 83.51% відповідно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кліматичні ризики змінюють пріоритети в управлінні портами, переміщуючи фокус із забезпечення стабільного локального енергопостачання діяльності на досягнення системної енергетичної стійкості. Це потребує рішень на рівні топології мереж, вибору джерел і акумуляторів, які враховують роботу терміналів, екологічні вимоги та міжпортову конкуренцію і саме нові дослідження пропонують портово-орієнтовані інтегровані мультиенергетичні системи (I-MES), у яких точки м'якого відкриття (SOP) та системи зберігання енергії (ESS) взаємодіють у межах контуру управління для згладжування піків, ізоляції несправностей і підтримки критичних навантажень під час екстремальних ситуацій [1-2].

Паралельно розробляється методологічна база для адаптації до зміни клімату, що включає стратегічні огляди, політику, інструменти оцінки впливу на навколишнє середовище та космічні спостереження, щоб пов'язати планування інфраструктури з викидами, якістю повітря та соціально-економічними наслідками [3-11]. Емпірично підкріплена рамка I-MES для декарбонізації портів демонструє, що синхронізація профілів попиту терміналів із локальною генерацією та накопиченням зменшує потребу в «брудних» пікових потужностях і одночасно підвищує надійність під час збурень мережі [1]. У цій логіці скоординована конфігурація SOP та ESS постає як ядро операційної стійкості: SOP перерозподіляють потужність між сегментами мережі та відсікають пошкоджені ділянки, тоді як ESS забезпечують миттєву підтримку частоти/напруги, резерв для критичних споживачів і можливість енергетичного «арбітажу» між періодами різної ціни/вуглецевості [2]. Робастні постановки оптимізації показують, що врахування невизначеності кліматичних екстремумів і варіабельності ВДЕ змінює пріоритети розміщення та розмірності SOP/ESS, зсуваючи рішення від статичних «найкращих середніх» до конфігурацій, стійких до «хвостових» сценаріїв. Такі висновки резонують із ширшим оглядом

наукових трендів: системи стійкості портів переходять від концептуальних декларацій до даних-керованих підходів, де інтегруються цифрові твіни, енергетичні та логістичні модулі, сенсорні мережі й політики адаптації [3].

Загалом, регіональні дослідження дають можливість оцінити перспективи розвитку портової інфраструктури в умовах кліматичних ризиків. Регіональні дослідження дають уявлення про поточний стан і перспективи розвитку портів у контексті кліматичних викликів. Аналіз, проведений у Великій затоці, дійшов до висновку про необхідність заходів з адаптації, зокрема в інфраструктурі та розвитку якісних місцевих систем виробництва й зберігання енергії. При цьому, до гнучких енергетичних з'єднань слід відноситись не стільки як інвестиційних витрат, скільки як інструменту захисту від підвищення рівня моря, штормови впливів і температурних аномалій [4]. Так само концепція водневого хабу демонструє, що відповідна інфраструктура повинна з'єднуватись з I-MES та енергосистемами зберігання (ESS), а не обмежуватися демонстраційним проєктом [5].

Стандартизація оцінювання сталості через атрибути ЦСР формує індикативне поле, куди природно вбудовуються метрики енергетичної стійкості, керовані саме через SOP/ESS-рішення [6]. Макрорівневі оцінки кліматичної стійкості в країнах Африки показують, що уразливість інфраструктури та інституційні бар'єри можуть нівелювати технічні вигоди; це сигналізує про необхідність поєднувати інженерні оптимізації з інституційним дизайн-мисленням [7]. Огляд стратегій адаптації портів із різних теоретичних позицій підтверджує, що порт-центрична енергетична стійкість має бути інтегрована у просторове планування, фінансування та регуляторні рамки, інакше технічні рішення не масштабуються [8].

Моніторинг і верифікація рішень потребують даних високої просторово-часової роздільності. Супутникове картування NO₂ у припортових акваторіях створює зворотний зв'язок між енергетичними інтервенціями (зокрема перемиканням на низьковуглецеві профілі й шунтуванням пікових навантажень через ESS) і фактичними змінами якості повітря [9]. Інтеграція кліматичних ризиків у процедури ОВД стає процесним «воротарем»: без урахування сценаріїв екстремумів і траєкторій декарбонізації проєкти модернізації портових мереж ризикують створити «застиглі активи» [10]. Моделі інвестицій в адаптацію та ємність у конкурентному міжпор-

товому середовищі показують, що енергетична стійкість-це стратегічна перевага: порти з гнучкою I-MES, SOP і ESS утримують більшу частку вантажопотоку під кліматичною невизначеністю, попри CAPEX-премію [11].

Інші праці про зміну експлуатаційного стану суден під час перевезення негабаритів додають «мікро-рівень» варіабельності: динаміка метacentричної висоти, перерозподіл мас і операційні обмеження в умовах шляху прямо впливають на профіль електро- та енерговикористання, а отже, на вимоги до оперативних резервів ESS і топології живлення причалів [12-14]. Фактично, порт-центрична стійкість не може відриватися від судноцентричної експлуатаційної динаміки: SOP/ESS-планування має враховувати нерівномірність підходів/відходів, чутливість до погодних умов та профілі енергоспоживання допоміжних систем, що змінюються під час роботи судна в рейсі та на стоянці. Оцінювання потенційно негативних факторів на експлуатаційний стан судна слугує джерелом сценаріїв для «робастної» оптимізації: ті самі сценарії повинні бути присутні у множині невизначеностей для I-MES, аби портова мережа залишалася стійкою до змін попиту й режимів судових систем [14].

Узгодження цих рівнів у єдиному фреймворку можна описати як багатопланову координацію. На стратегічному шарі порти формують дорожні карти декарбонізації та адаптації з урахуванням теоретично різних, але взаємодоповнюючих перспектив-технічної, інституційної та економічної [3, 6, 8]. На тактичному шарі визначаються місця розташування SOP, розмірність і типи ESS (BEES, гібриди з H₂), а також схеми взаємодії з ВДЕ та енергоринками; рішення тут приймаються в робастних постановках зі сценаріями екстремальної морепогоди й відмов мережі [2, 4, 5, 11]. На операційному шарі діють правила диспетчеризації: пріоритизація критичних навантажень (безпека, навігаційне обладнання, рефрижератори), адаптивне згладжування піків, трансформація графіків швартування/перевалки під очікувані кліматичні збурення; саме тут супутникові та ін-ситу дані замикають контур керування [1, 9-10]. На рівні шару моделі експлуатаційної динаміки суден, розроблені для складних рейсів і негабариту, слугують генераторами «збуджень» для портових енергетичних сценаріїв, забезпечуючи консистентність між морською та береговою частинами системи.

У підсумку, портцентричне планування енергетичної стійкості набуває рис інтегрованого,

даних-керованого процесу, де SOP та ESS-не окремі технологічні «вставки», а керовані важелі у багаторівневій I-MES. Дані й емпіричні оцінки підтверджують, що координація SOP/ESS знижує вуглецевість, скорочує простої та підтримує критичні сервіси під час кліматичних збурень, тоді як інструменти моніторингу (супутникові, ОВД) і стратегічні рамки адаптації забезпечують керованість і підзвітність інвестицій. Водночас практична імплементація потребує «зшивання» з експлуатаційними моделями флоту: без урахування судових режимів та їхньої варіабельності портова енергомережа залишатиметься недокаліброваною до реальних піків та ризиків. Саме скоординований SOP-ESS-підхід у зв'язці з даними та сценаріями на всіх рівнях-від судна до порту-і становить найбільш перспективну траєкторію підвищення енергетичної стійкості портів під кліматичною невизначеністю.

Зростаюча частота екстремальних кліматичних подій, таких як урагани, спека, шторми, викликає суттєві перебої в роботі портових енергетичних систем, що ускладнює підтримання безперервної роботи критичних інфраструктур. У цьому контексті забезпечення енергетичної стійкості портів набуває стратегічного значення як для функціонування національної логістики, так і для збереження безперервності глобальних ланцюгів постачання. Але водночас, процес інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) до портових енергосистем, хоч і підвищує екологічну сталість, суттєво ускладнює енергетичне планування через варіативність генеруючих профілів.

На сьогодні ключовим напрямом модернізації портових мультиенергетичних систем (PIMES) є впровадження систем накопичення енергії (ESS) та гнучких точок з'єднання (SOP). Проте переважна більшість досліджень зосереджена на окремому застосуванні цих технологій, не враховуючи їхню взаємодію в умовах зовнішніх стрес-факторів. Крім того, спостерігається дефіцит наукових підходів, що враховують як стратегічну (довгострокове конфігурування потужностей), так і оперативну (реальна диспетчеризація) координацію між SOP та ESS.

Окремо варто наголосити, що існуючі рішення з розміщення та планування ESS та SOP, як правило, не враховують структурну ієрархію портових навантажень, яка передбачає різний рівень критичності функцій (освітлення, швартування, безпека, холодильні потужності, тощо). Унаслідок цього у кризових ситуаціях відсутня системна підтримка прийняття рішень щодо пріоритезації

живлення, що призводить до збоїв у ключових логістичних процесах.

Таким чином, постає потреба у створенні інтегрованої, стійкої до невизначеностей, системи планування і оперативного керування портовими енергосистемами, яка базуватиметься на скоординованій роботі SOP та ESS і дозволить враховувати сценарії змін ВДЕ, забезпечити пріоритетне живлення критичних навантажень, мінімізувати сукупні витрати на втрати потужності та балансувати між економічною доцільністю та стійкістю.

Виклад основного матеріалу. Запропонована методологія базується на побудові двоступеневої оптимізаційної моделі, яка забезпечує синхронізоване стратегічне та оперативне планування у портах з мультиенергетичною архітектурою. Модель враховує як невизначеність, пов'язану з генерацією відновлюваної енергії (ВДЕ), так і структурну ієрархію критичності споживачів, що дозволяє забезпечити ефективне реагування на зовнішні збурення.

На першому етапі функціонує підсистема стратегічного планування, яка визначає оптимальні потужності для систем зберігання енергії (ESS) та точок м'якого відкриття (SOP), з метою мінімізації сукупних капітальних витрат і ймовірності втрати навантаження в цілому. На другому етапі представлено підсистему оперативного реагування, яка активується у разі зовнішнього порушення (наприклад, аварійного відключення зовнішнього живлення) і формує адаптивну стратегію диспетчеризації ESS та перемикання SOP залежно від важливості електроспоживачів та доступних енергоресурсів.

Особливу увагу в моделі приділено врахуванню невизначеності, зокрема варіативності генерації сонячної та вітрової енергії. Для цього використано метод робастної оптимізації, що ґрунтується на сценарійному описі можливих відхилень. Зокрема, множина сценаріїв формується на основі статистичних даних, які відображають коливання у потенціалі ВДЕ у часовому розрізі.

Ключовим елементом моделі є ієрархія критичності навантажень, яка поділяє портових споживачів на три категорії:

- Рівень 1 – критичні навантаження (системи безпеки, аварійне освітлення, навігаційне обладнання);
- Рівень 2 – важливі навантаження (вантажопідйомні механізми, холодильні установки);
- Рівень 3 – другорядні навантаження (адміністративні будівлі, офіси тощо).

Представлена класифікація дозволяє реалізувати адаптивний підхід до управління енерго-

споживанням, забезпечуючи пріоритетну подачу живлення на критичні об'єкти при обмеженості ресурсів. Оптимізаційна модель реалізується на основі алгоритму Column-and-Constraint Generation (C&CG), що є ефективним інструментом для вирішення задач великої розмірності. У рамках цього підходу загальна задача розділяється на дві: основну (master problem), яка формує первинні рішення, та допоміжну (sub-problem), що перевіряє стійкість рішень у контексті найбільш несприятливих сценаріїв.

Формалізованою метою моделі є мінімізація сукупних витрат, до яких входять:

- капітальні витрати на встановлення ESS та SOP;
- втрати, пов'язані з відключенням електропостачання споживачів;
- операційні витрати на експлуатацію та диспетчеризацію ESS у динамічних умовах.

Для валідації моделі використано емпіричні дані, зокрема: технічні характеристики реальної мультиенергетичної системи PIMES у порту Нінбо-Чжоушань [1], профілі сонячної та вітрової генерації за 2023–2024 роки, а також типові структури енергоспоживання в портах середнього тоннажу.

Результати моделювання та ефективність SOP-ESS конфігурації. Вхідні параметри та сценарії. Для проведення моделювання були використані реальні дані порту Ningbo Zhoushan (Китай), що включали структуру споживання електроенергії за рівнями навантаження (Tier I-III), статистику відключень живлення та профілі генерації відновлюваних джерел (сонячної та вітрової). На цій основі було сформовано три сценарії функціонування: оптимістичний (А) з нормальною генерацією від ВДЕ та частковим навантаженням; номінальний (В) із середнім навантаженням та помірними перебоями у відновлюваній генерації; песимістичний (С), що відтворює умови blackout із відмовою зовнішньої мережі та низьким виробітком ВДЕ.

Конфігурації та результати. У кожному сценарії були оцінені три конфігурації: робота лише з ESS, лише з SOP та комбінована стратегія SOP+ESS. Результати порівняння показали, що ізольоване використання як накопичувачів, так і точок м'якого відкриття забезпечує лише часткове покриття критичних навантажень і не дозволяє досягти достатнього рівня стійкості системи. Натомість інтегрована координація ESS та SOP продемонструвала найвищу ефективність: зниження ризиків відключень, можливість ізоляції

аварійних ділянок мережі та забезпечення живлення пріоритетних навантажень навіть у разі повного відмовлення зовнішнього енергопостачання. Це підтверджує практичну доцільність запропонованої моделі для підвищення енергетичної стійкості портів I-MES.

Порівняльна оцінка конфігурацій. Для кількісної перевірки ефективності різних конфігурацій було здійснено порівняльний аналіз за низкою показників, що характеризують стійкість портової енергетичної системи. До критеріїв віднесено відсоток забезпечення критичних навантажень (Tier I), середній обсяг примусового відключення навантажень (Tier II-III), час повного відновлення критичних споживачів, рівень економії витрат на компенсацію простоїв, відносну вартість інвестицій та економічну ефективність (ROI за п'ять років). Це дозволило об'єктивно порівняти три конфігурації: лише ESS, лише SOP та комбіновану стратегію ESS+SOP, Табл. 1.

Результати, які наведені у таблиці 1, демонструють, що ізольоване використання ESS або SOP забезпечує частковий ефект у покритті критичних навантажень і скороченні простоїв. Так, ESS дозволяє підтримати 83,1% Tier I навантажень, тоді як SOP – 88,4%, але в обох випадках показник load-shedding для Tier II-III залишається високим. Запропонована комбінована стратегія ESS+SOP показала найбільш збалансований результат: 100% забезпечення критичних навантажень, суттєве зменшення обсягів load-shedding до 9,1 MWh, а також скорочення часу відновлення до менше ніж однієї години, але між іншим, інтегрована конфігурація має найвищу економічну ефективність ($ROI = 3,4$), що свідчить про виправданість додаткових інвестицій та стратегічну доцільність її впровадження у портів багатенергетичних системах.

Інтерпретація результатів. Координована стратегія ESS+SOP демонструє найкращі результати за всіма ключовими критеріями: вона гарантує безперебійну роботу критичних систем порту навіть у випадках повного припинення зовніш-

нього енергопостачання. Зокрема повна компенсація Tier I навантажень у всіх сценаріях, зниження втрат від простоїв на понад 80% у порівнянні з поодинокими стратегіями. Швидке відновлення критичних вузлів складає менше 1 години. Попри дещо більші початкові інвестиції, модель швидко окупається за рахунок зниження штрафних та компенсаційних витрат та стабільного функціонування порту.

Для energy managers та логістичних директорів портів ключовими є такі висновки що в умовах кліматичних ризиків (буревії, тайфуни, спека) неефективно покладатися лише на ESS або лише на SOP – потрібна синергія. Тому сценарна оптимізація дозволяє адаптуватися до змін середовища в реальному часі, знижуючи ризик перебоїв. Модель SOP-ESS є гнучкою до масштабування та може бути адаптована для портів Чорноморського регіону України, з урахуванням локальної специфіки інфраструктури та політики декарбонізації.

Обговорення та практичні рекомендації. Запропонована модель координації SOP та ESS продемонструвала не лише підвищення енергетичної стійкості портів мультиенергетичних систем, але й дала змогу сформувати низку управлінських висновків. По-перше, підтверджено, що синергетичне використання SOP та ESS значно перевершує ефективність їх окремого застосування, особливо в умовах зовнішніх збоїв або пікових навантажень. По-друге, дворівнева стратегія оптимізації забезпечує адаптивність у реагуванні на критичні сценарії та дозволяє підтримувати безперервну роботу пріоритетних навантажень навіть за тривалих порушень енергопостачання. Це робить модель придатною як для стратегічного планування, так і для оперативного управління портовою енергетичною інфраструктурою.

Інтеграція таких рішень у стратегічне управління портами передбачає:

- включення сценаріїв кліматичних ризиків у стратегічне планування портової інфраструктури, зокрема через регулярне оновлення класифікації навантажень за критичністю;

Таблиця 1

Порівняльна ефективність різних конфігурацій SOP-ESS у PIMES за результатами моделювання

Показник ефективності	ESS Only	SOP Only	ESS + SOP
% забезпечення Tier I навантажень	83.1%	88.4%	100.0%
Середній обсяг load-shedding (Tier II-III), MWh	42.7	23.4	9.1
Час повного відновлення критичних навантажень	3 год	2 год	<1 год
Економія витрат на компенсацію простоїв, %	-	45.76%	83.51%
Вартість інвестицій (у відносних одиницях)	1.00	0.82	1.11
Економічна ефективність (ROI за 5 років)	1.6	2.1	3.4

– формування портової політики резервного енергозабезпечення, де ESS виступає як ключовий ресурс для енергетичного шок-поглинання, а SOP забезпечує гнучкість мережі;

– застосування результатів оптимізації до прийняття управлінських рішень, зокрема у виборі постачальників обладнання, розподілі інвестицій, та визначенні черговості модернізації енергетичної інфраструктури.

Також виявлено потенціал практичного використання моделі як основи для портового енергоменеджменту в реальному часі, з можливістю адаптації до змін попиту, генерації та доступності ресурсів, що може бути масштабовано для інших критичних об'єктів інфраструктури, таких як аеропорти або логістичні хаби, які мають схожу мультиенергетичну архітектуру та чутливість до кліматичних загроз. Окремої уваги заслуговує економічна доцільність впровадження запропонованої системи: результати моделювання свідчать про можливість зниження витрат на аварійні простой до 45-85%, що має суттєвий вплив на операційну ефективність порту, що підтверджує доцільність розгляду спільної SOP-ESS стратегії як частини довгострокових інвестиційних програм розвитку стійких портів.

Висновки. У статті запропоновано підхід до підвищення енергетичної стійкості портових мультиенергетичних систем в умовах кліматичних ризиків шляхом спільної оптимізації систем гнучкого з'єднання (SOP) та накопичувачів енергії (ESS). Розроблена дворівнева модель робастної оптимізації поєднує стратегічне планування потужностей із адаптивним управлінням у післяаварійних сценаріях, що забезпечує 100% покриття критичних навантажень, скорочення часу відновлення до однієї години та значне зниження витрат на відмови системи. Отримані результати доводять, що інтеграція SOP та ESS є не лише технічно, а й економічно доцільною, оскільки поєднує надійність з високою віддачею інвестицій.

Наукова новизна роботи полягає у побудові синергетичної моделі спільної дії SOP і ESS з урахуванням кліматичної невизначеності та ієрархічного механізму пріоритетності навантажень. Практичне значення полягає у можливості інтеграції моделі в системи енергоменеджменту портів і розробці стратегій реагування на надзвичайні ситуації. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування водневих технологій, мережних ефектів і кіберзагроз, а також створення цифрових двійників енергосистем для сценарного аналізу в реальному часі.

Список літератури:

1. Yu S., Huang Z., Tang D., Ma W., Guerrero J. M. The Role of Integrated Multi-Energy Systems Toward Carbon-Neutral Ports: A Data-Driven Approach Using Empirical Data. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, № 3. P. 477. DOI: 10.3390/jmse13030477.
2. Ma W., Tang D., Dong M., Arasteh H., Guerrero J. M. Coordinated robust configuration of soft open point and energy storage systems for resilience enhancement of integrated multi-energy system at ports. *Applied Energy*. 2025. Vol. 401. P. 126644. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.126644.
3. Türkistanlı T. T., Özispa N., Tuğdemir Kök G., Özdemir Ü., Pehlivan D. Exploring Research Trends on Climate Change: Insights into Port Resilience and Sustainability. *Sustainability*. 2024. Vol. 17, № 8. P. 3542. DOI: 10.3390/su17083542.
4. Yang Z., Lau Y., Poo M. C. P., Yin J., Yang Z. Port resilience to climate change in the Greater Bay Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. Vol. 142. P. 104681. DOI: 10.1016/j.trd.2025.104681.
5. Kordi A., Mohebbi K., Ledari M. B., Shirafkan S. M. Transforming Ports for a Low-Carbon Future: Nexus Modeling of Hydrogen Infrastructure, Employment, and Resource Management in Contrasting Climates. *Energy Nexus*. 2025. P. 100515. DOI: 10.1016/j.nexus.2025.100515.
6. Cunha D. R., Costa M. D. C., Oliveira C. B. M., Pereira N. N. SDG attributes: A sustainability assessment framework for Brazilian ports. *Marine Policy*. 2025. Vol. 181. P. 106841. DOI: 10.1016/j.marpol.2025.106841.
7. Xiong M., Zhao R., Li X., Wang Y., Xu Z., Li F. Climate resilience assessment of sustainability at national level: A case study of sub-Saharan Africa. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 430. P. 139717. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139717.
8. Ng A. K., Poo M. C., Wang T., Becker A., Lau Y., Xu T. Z., Yang Z. Dissecting climate adaptation strategies and planning of ports from different theoretical angles. *Transport Economics and Management*. 2025. Vol. 3. P. 46–56. DOI: 10.1016/j.team.2025.01.001.
9. Abdullah M. A., Chuah L., Abdullah S. B., Bokhari A., Syed A., Elgorban A. M., Akhtar M. S., Al-Shwaiman H. A., Asif S. From port to planet: Assessing NO₂ pollution and climate change effects with Sentinel-5p satellite imagery in maritime zones. *Environmental Research*. 2024. Vol. 257. P. 119328. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119328.

10. Guo M., Hui J., Chan K. K., Zhu Y. Enhancing Hong Kong's climate resilience: Integrating climate change into environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*. 2025. Vol. 115. P. 107982. DOI: 10.1016/j.eiar.2025.107982.
11. Xia W., Mishra J., Adulyasak Y. Seaport adaptation and capacity investments under inter-port competition and climate-change uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024. Vol. 130. P. 104183. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104183.
12. Onyshchenko S., Melnyk O. Modelling of changes in ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargo. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol. 6, № 2. P. 66–70. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.221653.
13. Melnyk O., Malaksiano M. Effectiveness Assessment of Non-Specialized Vessel Acquisition and Operation Projects, Considering Their Suitability for Oversized Cargo Transportation. *Transactions on Maritime Science*. 2020. Vol. 9, № 1. P. 23–34. DOI: 10.7225/toms.v09.n01.002.
14. Onyshchenko S., Shibaev O., Melnyk O. Assessment of Potential Negative Impact of the System of Factors on the Ship's Operational Condition During Transportation of Oversized and Heavy Cargoes. *Transactions on Maritime Science*. 2021. Vol. 10, № 1. P. 126–134. DOI: 10.7225/toms.v10.n01.009.

Lukin Ye.O. PORT-CENTRIC ENERGY RESILIENCE PLANNING UNDER CLIMATE RISK: A COORDINATED SOP-ESS OPTIMIZATION APPROACH

The article explores approaches to strengthening the energy sustainability of port systems in the context of growing climate risks through the joint optimization of energy storage systems (ESS) and flexible sorting interfaces (SOP). Ports, which are at the center of international logistics, are now facing increasingly serious problems due to the loss of renewable energy, the instability of the external power system, and the high criticality of uninterrupted power supply. The paper presents a model for managing the energy resilience planning of ports to ensure the uninterrupted operation of critical loads during emergencies and extreme situations. Based on a review of current scientific approaches, a two-stage optimization structure for ESS-SOP configurations has been developed, which allows for coordinated planning of both storage capacity and fault response logic. Criteria for economic rationality, operational readiness, and load security levels have been introduced. Modeling has been specified, taking into account the stochastic nature and wind and solar generation, which is extremely important for port PIMES (port-integrated multi-energy systems). It has been shown that joint planning of ESS and SOP can significantly reduce load losses, ensure rapid restoration of critical facilities, and reduce accident response costs by almost 45%. In addition, the feasibility of measures to implement comprehensive approaches to improving the reliability of port energy supply, combining technical planning with elements of strategic management, is justified. This approach meets modern requirements for the safety, energy efficiency, and adaptability of port infrastructure in the context of climate challenges and threats to global supply chains. The practical significance of the research results lies in the fact that the proposed model can be used in planning the modernization of port infrastructure, as well as to support decision-making by energy system operators in crisis conditions. Its adaptability to changes in energy load and weather conditions ensures the stable operation of key port facilities in the long term.

Key words: port energy sustainability, multi-energy systems, energy storage systems (ESS), soft connection points (SOPs), robust optimization, critical loads, climate risk adaptation, renewable energy, load prioritization, power system planning.

Дата надходження статті: 08.09.2025

Дата прийняття статті: 26.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 656.13:658
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/40>

Прокудін О.Г.

Національний транспортний університет

Воркут Т.А.

Національний транспортний університет

Петунін А.В.

Національний транспортний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИКИ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЦЕНТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ DIGITAL TWIN: СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТА КОМУНІКАЦІЙНІ ПІДХОДИ

У статті досліджуються можливості оптимізації логістичних процесів розподільчих центрів шляхом впровадження технології Digital Twin. Сучасні розподільчі центри стикаються з низкою викликів, пов'язаних з оптимізацією матеріальних потоків, прогнозуванням попиту, зниженням транспортних і складських витрат, а також забезпеченням гнучкості ланцюгів постачання в умовах мінливих ринкових факторів. Традиційні підходи управління дедалі частіше виявляються недостатніми через складність координації між постачальниками, центрами дистрибуції та торговельними точками. У статті «Оптимізація логістики розподільчих центрів за допомогою Digital Twin: сучасні інформаційні та комунікаційні підходи» обґрунтовано доцільність використання технології Digital Twin як інноваційного інструменту, що забезпечує високоточне моделювання, аналіз і оптимізацію логістичних процесів.

Метою дослідження є вивчення потенціалу технології Digital Twin для підвищення ефективності роботи розподільчих центрів. Об'єктом виступають внутрішні й зовнішні логістичні процеси, пов'язані з дистрибуцією товарів. Методологічну основу становить аналіз наукових публікацій і практичних кейсів провідних компаній (Siemens, McKinsey, BEUMER Group, RELEX Solutions). У роботі запропоновано трирівневий алгоритм впровадження цифрових двійників: створення цифрової моделі розподільчого центру з урахуванням категоризації товарів, просторово-часових параметрів, транспортних та складських витрат; інтеграція даних з різних джерел та застосування прогнозової аналітики на базі методів машинного навчання для передбачення змін попиту; оптимізація потоків із використанням математичного програмування та сценарного моделювання.

Результати дослідження свідчать, що впровадження Digital Twin здатне скоротити транспортні витрати на 15–25%, покращити оборотність запасів на 10–30% та підвищити точність виконання замовлень на 5–15%. Успішні приклади, як-от кейс Siemens, підтверджують можливість досягнення значної економії витрат та підвищення продуктивності без зниження рівня сервісу. Водночас виявлено низку бар'єрів, серед яких — проблеми якості даних, дефіцит кваліфікованих кадрів та організаційний опір змінам. Подолання цих перешкод можливе завдяки поетапному впровадженню та демонстрації «швидких перемог».

Практична значущість роботи полягає в тому, що вона формує базу для використання Digital Twin у діяльності роздрібних, виробничих і логістичних компаній, а також пропонує інструментарій для управлінців та IT-фахівців. Результати можуть бути використані як у професійній практиці, так і в освітньому процесі з підготовки спеціалістів у сфері логістики та управління ланцюгами постачань.

Ключові слова: Digital Twin, розподільчий центр, логістика, ланцюг постачань, оптимізація, прогнозування, витрати, ефективність, автоматизація.

Постановка проблеми. Сучасні логістичні системи розподільчих центрів стикаються з викликами, пов'язаними з оптимізацією потоків товарів, прогнозуванням попиту та мінімізацією витрат на транспортування і складське зберігання. Традиційні підходи до управління логістикою часто виявляються недостатньо ефективними через складність координації між постачальниками, розподільчими центрами та кінцевими точками реалізації. Інтеграція технології Digital Twin в роботу розподільчих центрів являє собою зміну парадигми в управлінні логістикою, дозволяючи організаціям моделювати, аналізувати та оптимізувати складні мережі ланцюгів поставок з безпрецедентною точністю. Створюючи віртуальні репліки фізичних логістичних систем, компанії можуть динамічно моделювати товарні потоки, прогнозувати попит, мінімізувати витрати на транспортування та складування, а також генерувати практичні рекомендації для покращення операційної діяльності. Цей підхід поєднує в собі аналітику даних у режимі реального часу, прогнозне моделювання та сценарне планування для вирішення багатограних проблем сучасних ланцюгів поставок, від вузьких місць в управлінні запасами до коливань цін на паливо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження підтверджують, що технологія Digital Twin є потужним інструментом для оптимізації логістичних процесів розподільчих центрів, підвищення точності прогнозування попиту та мінімізації витрат на транспортування й зберігання.

Siemens, McKinsey та BEUMER Group акцентують увагу на інтеграції цифрових двійників у логістичні системи. Наприклад, Siemens використовує систему Tenomatrix Plant Simulation, яка дозволяє динамічно адаптувати складські операції на основі реальних даних. McKinsey доводить, що цифрові двійники можуть знизити витрати на транспортування до 15% та покращити прогнозування попиту на 25%. BEUMER Group, у свою чергу, аналізує ефективність IoT-датчиків та ERP-систем у поєднанні з Digital Twin для автоматизації складської логістики та розробки оптимальних маршрутів поставок.

Окрему увагу дослідники приділяють впровадженню цифрових двійників у специфічних логістичних сегментах. Так, Ху Б. (Hu B.), Го Г. (Guo H.), Тао С. (Tao X.) та Чжан Ю. (Zhang Y.) [1, с. 73850] розробили Digital Twin-систему для холодних логістичних складів, що дозволяє покращити

контроль температурного режиму та ефективність зберігання товарів у холодильних камерах. Важливість оптимізації логістичних систем через цифрові двійники також відзначають Руохонмаа Г. (Ruohomaa H.), Салмінен В. (Salminen V.) та Торккель Й. (Torkkel J.) [4], які підкреслюють їхню роль у розвитку логістичних хабів та управлінні складською інфраструктурою.

Аспекти цифрової трансформації логістичних ланцюгів також розглядаються в роботах, присвячених стратегічним рішенням у сфері автоматизації та планування ресурсів. Оліватосін Абдул-Азіз (Oliwatosin Abdul-Azeez), Александра Огадімма Іхече́ре (Alexsandra Ogadimma Ihechere) та Кураж Ідемудіа (Courage Idemudia) [2, с. 339] досліджують інтеграцію Digital Twin у систему SAP S/4HANA, що дозволяє підвищити прозорість та ефективність управління постачанням. Шень Л. (Shen L.) та Цзан З. (Zang Z.) [5, с. 1827] розробили алгоритм оптимізації ланцюгів постачання на основі блокчейн-технологій, що сприяє підвищенню безпеки та прогнозованості логістичних процесів.

Окремий напрям досліджень Digital Twin стосується стійкого виробництва та екологічної логістики. Хан Мд. С. (Khan Md. S.) та співавтори [6, с. 370] досліджують централізовані цифрові двійники у виробництві, що дозволяють оптимізувати використання ресурсів та покращити екологічну складову постачання. Купалова Г., Гончаренко Н. та Дуднік М. [3, с. 84] аналізують екологічну модернізацію підприємств через логістичні технології, включаючи застосування цифрових двійників для скорочення викидів CO₂ та оптимізації вантажних потоків.

Деякі дослідники фокусуються на інтеграції Digital Twin у прогнозування та управління ланцюгами поставок. Ань Й. (An Y.), Хань Й. (Han Y.), Сюй Й. (Xu Y.), Оуян С. (Ouyang S.), Чжан М. (Zhang M.) та Чень С. (Chen S.) [7, с. 47098] пропонують допоміжну модель для управління логістикою в виробничій сфері, що дозволяє знизити витрати та підвищити ефективність розподілу товарів. Важливість якісних даних для роботи Digital Twin підкреслюється у дослідженні RELEX Solutions, де наголошується на необхідності стандартизації інформаційних потоків та автоматизації процесів обробки великих масивів даних.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують ефективність цифрових двійників у сфері логістики, однак залишається ряд викликів, пов'язаних із інтеграцією даних з різних джерел, управлінням ресурсами та адаптацією логістичних систем до змінного попиту.

Метою статті є оптимізація логістичних процесів розподільчих центрів шляхом впровадження технології Digital Twin.

Виклад основного матеріалу. Цифрове моделювання розподільчого центру: створення Digital Twin. Процес цифрового моделювання передбачає створення детальної моделі фізичного активу. Ця модель, що розробляється за допомогою різних технологій, включає всі необхідні характеристики та параметри реального об'єкта.

Етап 1: Параметризація системи та визначення базових ліній моделі. Процес моделювання починається з комплексної системної параметризації, починаючи з категоризації товарів. Як зазначено в базовій логістичній структурі, це включає в себе різні типи обробки і зберігання для фруктів і овочів, холодозалежних і заморожених продуктів а також товарів, що не потребують спеціальних умов зберігання. Кожна категорія несе унікальні вимоги до щільності зберігання, типів транспортних засобів та показників обороту запасів, які безпосередньо впливають на конфігурацію складу та алгоритми маршрутизації всередині складу.

Паралельно з класифікацією продукції система встановлює макрогрупи для консолідації постачальників. Цей рівень абстракції вирішує складність управління тисячами окремих постачальників шляхом кластеризації їх у функціональні групи на основі географічної близькості, об'єму і частоти відвантаження та сумісності продукту. Така агрегація дозволяє більш точно моделювати витрати на поставки лагера (артикула), зберігаючи гранулярність там, де це операційно критично.

Етап 2: Визначення часових та просторових меж моделі. Ефективне функціонування цифрового двійника вимагає точного визначення часових рамок, із чітким розподілом періодів для збору базових даних (аналіз історичної продуктивності) та вікон моделювання (тестування майбутніх сценаріїв). Ця концепція охоплює як статичні мережі філій і розподільчих центрів (РЦ), так і можливі сценарії їхнього розширення, зокрема відкриття нових супермаркетів і дистрибуційних хабів. Це дозволяє оцінювати ефективність логістичних процесів як у стабільних умовах, так і в умовах можливих змін.

Просторові параметри включають моделювання витрат на транспортування, враховуючи коливання цін на паливо, тарифи зовнішніх перевізників, а також особливості маршрутів, зокрема обмеження, кількість точок та рівень трафіку.

Розрахунок вартості складу здійснюється за багатовимірним підходом, враховуючи постійні

інфраструктурні витрати, такі як оренда та амортизація обладнання, змінні операційні витрати, зокрема оплату праці за приймання, комплектування, пакування, а також плату за крос-докінг, дистрибуцію та відвантаження, а також додаткові витрати на обробку потоку, включаючи рух моно-палет і підйом або спуск зі зберігання.

Ці параметри використовуються в моделі витрат, скоригованій на інфляцію, яка прогнозує фінансові результати в умовах змінної ринкової і поточної ситуації.

Етап 3: Формування обмежень та сценаріїв моделювання. Фізичні та операційні обмеження є важливими вхідними даними для алгоритму Digital Twin. Обмеження пропускної здатності складу виражаються в кількості палет на годину, тоді як пропускна здатність транспорту визначається складом автопарку та коефіцієнтом використання транспортних засобів. Система генерує кілька сценаріїв «що було б, якби», поєднуючи ці обмеження з ринковими змінними та зовнішніми факторами. Серед них – 20% сплеск попиту під час святкових сезонів, 15% скорочення доступності перевізників, а також перебої в логістичних ланцюгах через обмежену доступність інфраструктури, спричинену зруйнованими або пошкодженими дорогами, мостами та залізничними вузлами. Додатково враховуються енергетичні обмеження, такі як відключення електроенергії та нестабільність постачання, що впливають на роботу складських комплексів і транспорту, зокрема холодильного обладнання. Крім того, система розглядає вимушену релокацію складів і виробництв для забезпечення безперебійного постачання товарів у безпечніші регіони, а також зростання попиту на критичні товари, зокрема медикаменти, продукти харчування та паливо, що вимагає адаптивного управління запасами.

На цьому етапі значну користь приносить задокументований підхід McKinsey до моделювання варіативності, коли цифрові двійники тестують розподіл потенційних результатів, а не одноточкові оцінки.

Інтелектуальна основа Digital Twin: від інтеграції даних до прогнозування попиту. Точність прогнозування Digital Twin у ланцюгах поставок критично залежить від двох ключових компонентів: інтеграції даних та механізмів динамічного прогнозування попиту. Створення ефективної аналітичної платформи вимагає гармонізації розрізнених потоків даних з різноманітних джерел.

Для ефективної роботи Digital Twin вкрай важлива якісна інтеграція даних з різноманітних

джерел, серед яких ключовими є історичні записи про відвантаження, що фіксують фактичні обсяги товарів, які переміщуються через розподільчі центри до філій, слугуючи основою для розуміння базового попиту та сезонних коливань. Не менш значущою є транспортна телематика, дані GPS-відстеження маршрутів та показники споживання пального якої не тільки оптимізують логістичні процеси, але й надають цінну інформацію про ефективність ланцюга поставок, опосередковано впливаючи на точність прогнозування. Важливими є також журнали системи управління складом, що відображають частоту відбору товарів, тривалість зберігання та інтенсивність перехресних перевантажень, розкриваючи динаміку складських операцій та допомагаючи ідентифікувати потенційні вузькі місця, що, своєю чергою, впливає на точність прогнозів доступності товарів. Нарешті, для врахування зовнішніх факторів, що впливають на загальний попит та необхідне позиціонування запасів, необхідний аналіз ринку, що включає інформацію про заплановані відкриття магазинів, демографічні зміни та активність конкурентів.

RELEX Solutions підкреслює, що якість даних є наріжним каменем успішного впровадження Digital Twin. Значні зусилля необхідні для очищення та стандартизації інформації зі старих систем. Сучасні методи попередньої обробки, такі як автоматизоване виявлення аномалій, інтерполяція пропущених значень та протоколи перерахунку одиниць виміру, вирішують ці проблеми, забезпечуючи надійність даних для подальшого аналізу.

Виходячи за межі традиційних методів прогнозування часових рядів, Digital Twin використовує інтелектуальні механізми динамічного прогнозування попиту. Інтелектуальні механізми динамічного прогнозування попиту в Digital Twin використовують моделі машинного навчання, що аналізують широкий спектр факторів, які впливають на споживчий попит. Зокрема, система враховує кореляцію між погодними умовами та продажами на рівні категорії, що дозволяє, беручи до уваги вплив погоди на певні групи товарів (наприклад, збільшення попиту на прохолодні напої у спеку), проактивно коригувати запаси. Крім того, аналізується вплив настроїв у соціальних мережах на попит на продукцію: аналіз настроїв та обговорень в соціальних мережах дає можливість виявляти тренди та передбачати зміни у споживчих перевагах, що є важливим для оперативного пристосування запасів. Також, система оцінює ефективність рекламних кампаній

у різних географічних регіонах: аналізуючи вплив рекламних акцій, Digital Twin допомагає оптимізувати розподіл ресурсів та прогнозувати сплески попиту у відповідь на маркетингові зусилля.

Ці механізми динамічного прогнозування дозволяють Digital Twin не просто реагувати на зміни попиту, а передбачати їх та проактивно коригувати позиціонування запасів. Дослідження McKinsey підтверджує значний потенціал такого підходу, показуючи, що можливості динамічного розрахунку страхового запасу можуть підвищити рівень виконання обіцянок споживачам на 20%. Таким чином, інтелектуальна основа Digital Twin, що поєднує якісну інтеграцію даних та передові механізми динамічного прогнозування, створює потужну систему для оптимізації ланцюга поставок та підвищення рівня обслуговування клієнтів.

Digital Twin для оптимізації ланцюга поставок використовує складний механізм оптимізації та моделювання потоків, спрямований на багатоцільову мінімізацію витрат. Основний алгоритм системи Digital Twin спрямований на багатоцільову мінімізацію витрат шляхом балансування конкуруючих пріоритетів у трьох ключових центрах. Перш за все, це транспортні витрати, які система розраховує як функцію від об'єму перевезення та відстані, враховуючи такі фактори, як витрати на паливо, оплату праці водіїв та технічне обслуговування транспорту, де ефективна мінімізація є ключовою для загальної оптимізації. Другим важливим центром витрат є витрати на складську обробку, що представляють собою змінні витрати на обробку кожного кубічного метра вантажу, які диференціюються залежно від типу потоку, і оптимізація складських процесів дозволяє знизити ці витрати, підвищуючи загальну ефективність. Нарешті, третім ключовим центром є витрати на зберігання запасів, до вартості яких входять капітальні витрати, пов'язані із заморожуванням коштів у запасах, ризику уцінки товарів через пошкодження або втрату якості, а також ймовірність застарівання продукції, особливо для товарів з коротким терміном придатності, і точне прогнозування та оптимізація рівня запасів дозволяє мінімізувати ці витрати.

Для пошуку оптимальних рішень система використовує змішане цілочисельне програмування, оцінюючи мільйони потенційних комбінацій потоків. Це дозволяє визначити оптимальні за Парето варіанти, що балансують між різними центрами витрат. Додатково, спеціалізовані евристичні алгоритми враховують нелінійні обмеження, такі як обмежена наявність рефрижератор-

ного транспорту в періоди пікового попиту або обмеження пропускної здатності різних зон руху потоків на складі.

В рамках оптимізації потоків, Digital Twin моделює чотири основні стратегії дистрибуції представлені на рисунку 2, кожна з яких ретельно оцінюється системою в реальному часі з урахуванням їх економічних та операційних характеристик. Перша стратегія – стандартна маршрутизація від РЦ до філії, оптимальна для філії в зоні обслуговування конкретного розподільчого центру, мінімізуючи проміжну обробку, скорочуючи час доставки та забезпечуючи стабільність поставок для підтримки високого рівня обслуговування клієнтів. Друга стратегія – перехресне складування (крос-докінг) через другий РЦ, що дозволяє оптимізувати логістику між віддаленими регіонами, де на першому РЦ формуються палети для філій іншого РЦ, транспортування відбувається через проміжний РЦ для доукомплектування, підвищуючи використання транспорту та зменшуючи витрати на великі відстані. Третя стратегія – реверсивна дистрибуція між РЦ, використовується для вирівнювання запасів між розподільчими центрами, коли перший РЦ формує палети для філій другого РЦ, ефективно балансує навантаження на склади, уникаючи дефіциту/надлишку запасів та забезпечуючи безперебійні поставки. Четверта стратегія – магістральні перевезення між РЦ, реалізує стратегічне переміщення великих обсягів товарів між розподільчими

центрами, наприклад, при обмеженні зберігання на одному РЦ, забезпечуючи гнучкість відбору товарів для філій, використовуючи ресурси всієї мережі розподільчих центрів.

Digital Twin забезпечує динамічне перенаправлення потоків у відповідь на зміни попиту, коливання ринкових умов або виникаючі логістичні обмеження. Можливість оперативної адаптації стратегій дистрибуції значно підвищує загальну ефективність ланцюга поставок та знижує витрати.

Для забезпечення надійності та точності, модель Digital Twin підлягає ретельній перевірці та постійному вдосконаленню. Валідація моделі починається з її перевірки на історичних даних для встановлення базової достовірності. Статистичні методи, зокрема бек-тестування, використовуються для порівняння змодельованих результатів з фактичними історичними показниками, оцінюючи точність прогнозування. Аналіз чутливості дозволяє визначити найбільш критичні вхідні параметри моделі, розуміння яких важливе для подальшого удосконалення. Ключовим елементом є цикли безперервного навчання, що передбачають інтеграцію нових потоків даних в систему. Це забезпечує постійне підвищення точності прогнозування та адаптацію моделі до мінливих ринкових умов і динаміки ланцюга поставок, гарантуючи актуальність та ефективність Digital Twin з плином часу.

Незважаючи на значний технологічний прогрес у сфері цифрових двійників, практика впровадження,

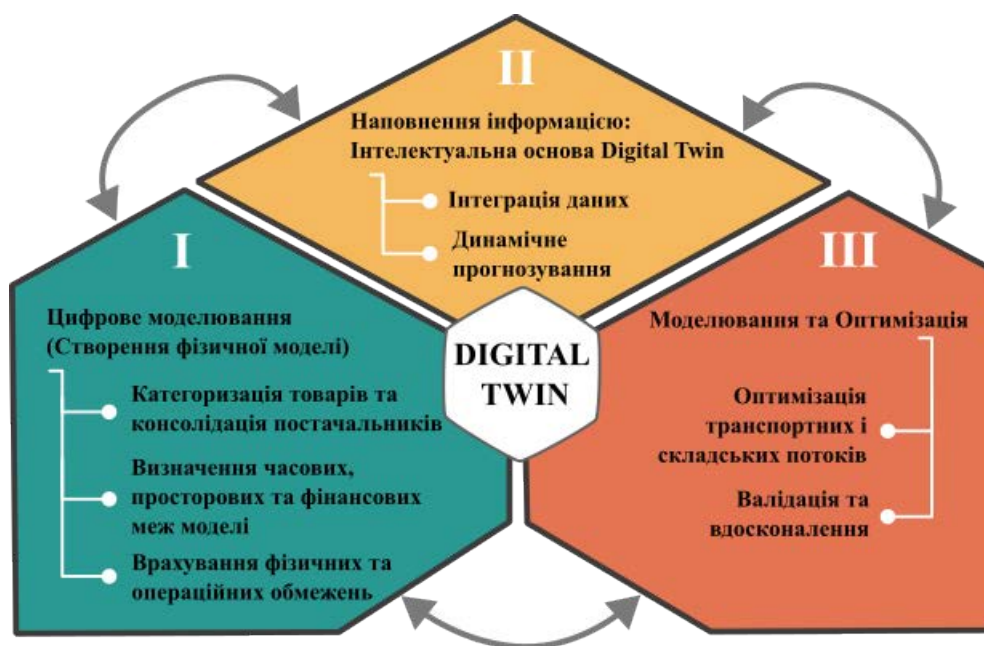


Рис. 1. Схема впровадження Digital Twin у логістиці: моделювання, інтеграція даних та оптимізація потоків

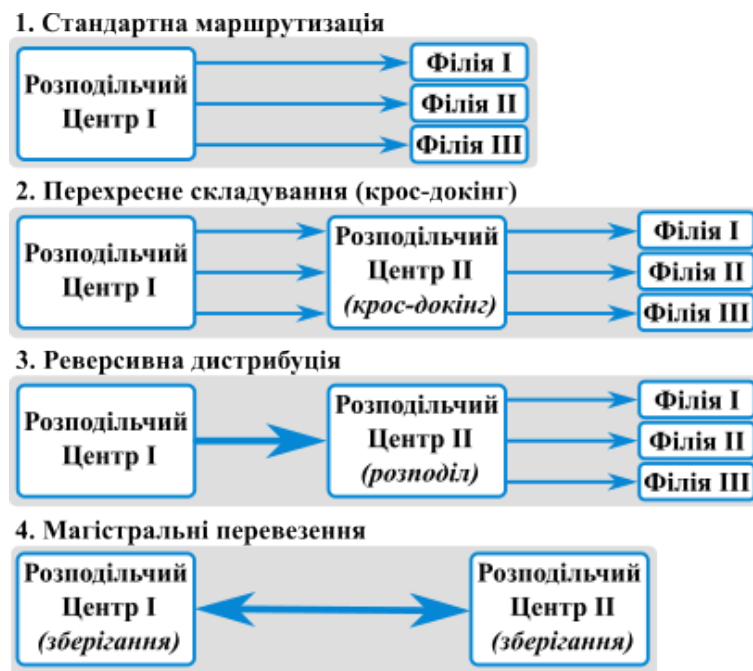


Рис. 2. Візуалізація чотирьох стратегій дистрибуції

як виявляє RELEX Solutions, стикається з рядом типових проблем, серед яких проблема сховищ даних, коли застарілі системи чинять опір інтеграції з сучасними аналітичними платформами, прогалини в навичках через нестачу персоналу, що однаково добре володіє як операціями ланцюга поставок, так і наукою про дані, та опір змінам з боку оперативних команд, що виявляють недовіру до рекомендацій, згенерованих на основі алгоритмів. При цьому, успішні приклади впровадження, такі як цифровий двійник складу Siemens, демонструють ефективні стратегії подолання цих перешкод, зокрема через поетапне розгортання, що дозволяє продемонструвати швидкі перемоги у вузьких областях процесів перед тим, як розширювати застосування технології на більші масштаби.

Впровадження центрального глобального розподільного центру Siemens слугує яскравою демонстрацією потенціалу логістичних цифрових двійників, адже компанія, поєднавши середовище симуляції заводу Tenomatix з реальними даними WMS, досягла значних результатів, включаючи 8% скорочення витрат на фрахт і пошкодження завдяки оптимізованому вибору перевізника, стовідсоткове виконання замовлень, попри 15% збільшення пропускної здатності, та 5% економії енергії завдяки моніторингу обладнання з високим споживанням в реальному часі. Таке успішне впровадження стало можливим завдяки структурованому підходу, що включав оцифрування фізичної інфраструктури через 3D-сканування планувань складу та шляхів

матеріальних потоків, аналіз процесів, що полягав у виявленні вузьких місць у комплектації на основі історичних патернів замовлень, тестування сценаріїв через моделювання пікових сезонних сплесків попиту та дефіциту робочої сили, та інтеграцію прескриптивної аналітики для автоматизованого планування змін на основі прогнозованих обсягів замовлень. Цей показовий проєкт чітко демонструє, як технологія Digital Twin перетворюється з аналітичного інструменту на систему підтримки оперативних рішень, зокрема, в контексті досягнення цілей сталого розвитку через підвищення прозорості енергоспоживання.

В контексті майбутньої еволюції, технологія Digital Twin демонструє тенденцію до інтеграції з роботизованою автоматизацією процесів (РАП), відкриваючи шлях до створення самооптимізуючихся логістичних мереж. Такі системи набувають здатності до автоматичного регулювання рівня страхових запасів на основі мінливості термінів виконання замовлень постачальниками, перенаправлення вантажів в обхід заторів у портах для оптимізації маршрутів та мінімізації затримок, та обговорення спотових тарифів з альтернативними перевізниками в умовах дефіциту потужностей для забезпечення гнучкості та економічної ефективності. За прогнозами McKinsey, розвиток цих можливостей у прогресивних організаціях сприятиме значному скороченню витрат на наскрізні ланцюги поставок на 10-15%.

Висновки. Стратегічне розгортання технології Digital Twin в операціях розподільчих центрів

пропонує трансформаційний потенціал для підвищення ефективності логістики. Впроваджуючи структуровану алгоритмічну основу, що охоплює параметризацію системи, інтеграцію даних з різних джерел та багатоцільову оптимізацію, організації можуть досягти помітного покращення ключових показників ефективності – як правило, на 15-25% скоротити транспортні витрати, на 10-30% покращити оборотність запасів та на 5-15% підвищити точність виконання замовлень.

Майбутній успіх залежатиме від подолання викликів, пов'язаних з інтеграцією даних за допомогою

надійних конвеєрів ETL, а також від налагодження міжфункціональної співпраці між фахівцями з ланцюгів поставок та спеціалістами з обробки даних. Як демонструють лідери галузі, ті, хто сприймає цифрових двійників як живі моделі, що розвиваються, а не статичні симуляції, отримують вирішальні конкурентні переваги на все більш нестабільному глобальному ринку. Розвиток технології в напрямку когнітивної автоматизації та оптимізації, орієнтованої на сталий розвиток, обіцяє переосмислити галузеві стандарти стійкості ланцюгів поставок та екологічного управління.

Список літератури:

1. Hu B., Guo H., Tao X., Zhang Y. Construction of Digital Twin System for Cold Chain Logistics Stereo Warehouse. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 2023. Vol. 11, P. 73850–73862. DOI: 10.1109/access.2023.3295819.
2. Oliwatosin Abdul-Azeez, Alexsandra Ogadimma Ihechere, Courage Idemudia. Optimizing supply chain management: strategic business models and solutions using SAP S/4HANA. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*. GSC Online Press. 2024. Vol. 11, Issue 1. P. 339–351. DOI: 10.30574/msarr.2024.11.1.0097.
3. Купалова Г., Гончаренко Н., Дуднік М. Екологічна модернізація логістики підприємств. *Український журнал прикладної економіки та технологій*. Друкарня Мадрид. 2024. Том 9. № 1. С. 84–88. DOI: 10.36887/2415-8453-2024-1-14.
4. Ruohomaa H., Salminen V., Torkkel J. Virtual technologies and digital twins for logistics hub development. *AHFE International*. 2024. Vol. 135. DOI: 10.54941/ahfe1004953.
5. Shen L., Zang Z. Enterprise supply chain network optimization algorithm based on blockchain-distributed technology under the background of digital economy. *Intelligent Decision Technologies*. SAGE Publications. 2024. Vol. 18, № 3. P. 1827–1839. DOI: 10.3233/idt-240680.
6. Khan Md. S., Chinnaiyan, R., Balachandar, S., Ibrahim, S. J. A., Chakravarthy, N. S. K., Kalaiarasan, C., Divya, R. Centralized Digital Twin driven Supply Chain for Sustainable Smart Manufacturing Plants. *International Conference on Computational Modelling, Simulation and Optimization (ICCMO)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2022. P. 370–373. DOI: 10.1109/iccmso58359.2022.00077.
7. An Y., Han Y., Xu Y., Ouyang S., Zhang M., Chen S. *An Auxiliary Model of Intelligent Logistics Distribution Management for Manufacturing Industry Based on Refined Supply Chain*. *IEEE Access*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2023. Vol. 11. P. 47098–47111. DOI: 10.1109/access.2023.3275010.
8. Kmiecik M. Digital Twin as a Tool for Supporting Logistics Coordination in Distribution Networks. *International Journal of Supply Chain Management*. ExcelingTech. 2023. Vol. 12, № 1. DOI: 10.59160/ijscm.v12.i01.6149
9. Stan M., Borangiu T., Raileanu S. Data- and model-driven digital twins for design and logistics control of product distribution. *23rd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*. IEEE. 2021. P. 33–40. DOI: 10.1109/cscs52396.2021.00013.

Prokudin O.G., Vorkut T.A., Petunin A.V. OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION CENTER LOGISTICS USING DIGITAL TWIN: MODERN INFORMATION AND COMMUNICATION APPROACHES

The article explores the potential of optimizing logistics processes in distribution centers through the implementation of Digital Twin technology. Modern distribution centers face a number of challenges related to the optimization of material flows, demand forecasting, reduction of transportation and warehousing costs, as well as ensuring supply chain flexibility under volatile market conditions. Traditional management approaches are increasingly insufficient due to the complexity of coordination between suppliers, distribution centers, and retail outlets. The paper "Optimization of Distribution Center Logistics Using Digital Twin: Modern Information and Communication Approaches" substantiates the relevance of using Digital Twin as an innovative tool for high-precision modeling, analysis, and optimization of logistics processes.

The aim of the study is to investigate the potential of Digital Twin technology to improve the efficiency of distribution center operations. The object of the research includes both internal and external logistics processes related to product distribution. The methodological basis consists of an analysis of scientific publications and

practical cases of leading companies (Siemens, McKinsey, BEUMER Group, RELEX Solutions). The paper proposes a three-stage algorithm for implementing digital twins: creating a digital model of the distribution center, taking into account product categorization, spatio-temporal parameters, transportation and warehousing costs; integrating data from diverse sources and applying predictive analytics based on machine learning methods to anticipate demand fluctuations; optimizing flows using mathematical programming and scenario-based modeling.

The findings indicate that the implementation of Digital Twin can reduce transportation costs by 15–25%, improve inventory turnover by 10–30%, and increase order fulfillment accuracy by 5–15%. Successful examples, such as the Siemens case, confirm the possibility of achieving significant cost savings and productivity gains without compromising service levels. At the same time, several barriers have been identified, including data quality issues, shortages of skilled personnel, and organizational resistance to change. These challenges can be mitigated through phased implementation and demonstration of “quick wins.”

The practical significance of the study lies in providing a foundation for the application of Digital Twin in the operations of retail, manufacturing, and logistics companies, as well as offering a toolkit for managers and IT specialists. The results may be applied both in professional practice and in educational programs for training specialists in logistics and supply chain management.

Key words: *Digital Twin, distribution center, logistics, supply chain, optimization, forecasting, costs, efficiency, automation.*

Дата надходження статті: 26.09.2025

Дата прийняття статті: 17.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 656.6:616-036
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/41>

Решетков Д.М.

Одеський національний морський університет

Ларіна І.М.

Одеський національний морський університет

ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ ГАЛУЗІ У КОНТЕКСТІ ОНОВЛЕНОЇ НАЦІОНАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СТРАТЕГІЇ УКРАЇНИ ДО 2030 РОКУ

У дослідженні розглядаються основні положення оновленої Національної транспортної стратегії України до 2030 року. Аналізується її вплив на реалізацію програмних документів розвитку у сфері морського транспорту з урахуванням викликів, що постали перед морськими портами України. Зазначається, що цей документ дозволяє привести Стратегію розвитку морських портів України до 2038 року та інвестиційні плани ДП «Адміністрація морських портів України» у відповідність із Національною транспортною стратегією. Представлено ключові виклики, з якими стикається галузь з початку війни, а також аналіз показників роботи портів у 2021-2024 роках та першому півріччі 2025 року. Визначено, що портова галузь повинна розвиватися в рамках конкурентоспроможної та ефективної транспортної системи для подальшої інтеграції в Трансєвропейську транспортну мережу (TEN-T). Підкреслено, що підготовка операційного плану заходів з реалізації Стратегії обумовлює актуальність теоретичної свідомості у питання розвитку морських портів світу. Доведено, що до змін традиційного укладу портової галузі привів цілий комплекс демографічних, технологічних та екологічних факторів, які впливають на повсякденну діяльність та формують низку важливих тенденцій. Обґрунтовано необхідність адаптації національної портової системи не лише шляхом оновлення інфраструктури, нормативно-правової бази та впровадження цифрових рішень, але й шляхом входження в систему співпраці в рамках міжнародної портової спільноти. Зроблено висновок, що розуміння основних тенденцій цього процесу для подальшого впровадження передового досвіду реалізації подібних проєктів, які випробували у портах по всьому світу, буде корисним для розвитку та модернізації морських портів України.

Ключові слова: Національна транспортна стратегія України, тенденції розвитку морських портів, цифрова трансформація.

Постановка проблеми. Збройна агресія російської федерації докорінно змінила транспортну систему України. Зазначені дії нанесли удар економіці України, оскільки морським сполученням до 2022 року здійснювалося близько 70% експорту українських виробників та значна частина імпорту.

Від ефективності функціонування морських портів України, рівня їх технологічного та технічного оснащення, відповідності системи управління та розвитку інфраструктури сучасним міжнародним вимогам залежить конкурентоспроможність вітчизняного транспортного комплексу на світовому ринку після війни.

Оновлена Національна транспортна стратегія України дозволить підвищити інституційну спроможність органів управління транспортного сектору, сприятиме розвитку людського капіталу,

цифровізації галузі з метою подальшої реалізації галузевих реформ та підтримки євроінтеграційного курсу України [1].

Цей документ дозволяє привести Стратегію розвитку морських портів України до 2038 року та інвестиційні плани ДП «Адміністрація морських портів України» у відповідність із Національною транспортною стратегією, що передбачає синергію між морськими портами, профільним міністерством та іншими органами виконавчої влади [2].

Оновлена Стратегія розбита на два етапи. Наразі затверджено операційний план заходів на 2025-2027 рр., і щороку профільне міністерство має звітувати уряду про стан виконання та фактичні значення показників досягнення стратегічних цілей. та підготувати проєкт плану на 2028-2030 рр. до 31 жовтня 2027 р. [5, 6].

Підготовка таких планів обумовлює актуальність теоретичної свідомості, у тому числі, у питання розвитку морських портів. Тому розуміння основних тенденцій цього процесу для подальшого впровадження передового досвіду реалізації подібних проєктів, які випробували у портах по всьому світу, буде корисним для розвитку та модернізації морських портів України [3, 4].

Аналіз досліджень і публікацій. Попри існуючі дослідження щодо функціонування та розвитку портової галузі України, у контексті трансформаційних викликів глобального масштабу, з якими вона зіштовхнулася в умовах війни, питання пошуку шляхів їх розвитку потребує постійного дослідження [9, 10, 11, 12].

Для виявлення сучасних тенденцій Організація Об'єднаних Націй (ООН) щорічно проводить конференцію з торгівлі та розвитку (ЮНКТАД), у ході якої приділяється особлива увага результатам діяльності та інноваціям у сфері морського транспорту з метою відстежити тенденції та забезпечити учасників ринку перевезень необхідною та актуальною інформацією: з цією метою випускаються звіти, що містять щорічну статистику, та огляди.

У 2020 році ЮНКТАД окреслив загальні тенденції у морському транспорті на найближче майбутнє. Однією з найбільш важливою є ініціатива, в якій морські порти виступають у ролі двигуна процесу глобалізації і є центрами логістичних та транспортних мереж, тому один з основних способів розвитку портів та терміналів на даний період та у перспективі – це поширення цифрових технологій. Прикладами інновацій є Інтернет речей, робототехніка, автоматизація, штучний інтелект, безпілотні транспортні засоби та обладнання, технологія блокчейн [13].

Підвищення ефективності портів і терміналів також розглядається як один із способів зростання: всі етапи обробки суден і вантажів на різних щаблях повинні розвиватися максимально для того, щоб будь-які затримки та зайві ланки були зведені до мінімуму. Таким чином, можливе досягнення збільшення пропускної здатності. Отже, порти повинні відповідати сучасним тенденціям і мати більш глибокі підхідні шляхи для суден, що задовольняє інноваційним технологіям обладнання, здатність забезпечувати інтенсивні вантажно-розвантажувальні роботи, збільшення складських зон, прискорення процесів митного очищення тощо.

Таким чином, перед транспортним комплексом кожної держави, яка є морською державою, сто-

ять певні завдання, які для свого рішення потребують розробки відповідних цільових програм із виділенням під них бюджетних коштів. До змін традиційного укладу портової галузі привів цілий комплекс демографічних, технологічних та екологічних факторів, які впливають на повсякденну діяльність та формують низку важливих тенденцій [14, 15].

Оскільки адміністрація порту, портові оператори, регулятори та інші стейкхолдери є важливими ланками в ланцюжку створення цінності в порті, їм необхідно розуміти, які зміни можуть відбутися і якими будуть наслідки.

Для розробки планів розвитку морських портів України представляє інтерес бачення основних тенденцій розвитку портів світу та можливі наслідки їхньої реалізації на практиці до 2030 року (табл. 1).

Метою дослідження є визначення основних напрямків і складових процесу відновлення морських портів України у післявоєнний період на базі узагальнення та критичної оцінки програмних документів держави у сфері морського транспорту з урахуванням загальних світових тенденцій та пріоритетів розвитку морських портів на найближче майбутнє.

Виклад основного матеріалу. У грудні 2024 року Уряд України схвалив оновлену Національну транспортну стратегію України до 2030 року (НТС). Також було затверджено операційний план заходів з реалізації Стратегії у 2025-2027 роках [1].

Відносно сучасного стану портової галузі у НТС відмічено, що станом на кінець 2024 року на підконтрольній Україні території залишилися 10 морських портів із 18-ти. Це порти Великої Одеси і порти Дунайського регіону – Південний, Одеса, Чорноморськ, Ізмаїл, Рені та Усть-Дунайськ. Ці порти продовжують працювати в умовах війни. Морські порти Миколаїв, Ольвія та Білгород-Дністровський з безпекових міркувань не можуть здійснювати повноцінну діяльність (суднозахід до цих портів сьогодні заборонений). Ці порти можуть працювати з суходолу. Закритим також залишається морський порт Херсон.

За підсумками 2024 року вантажообіг портів України досяг рекордного показника в 97,2 млн. тонн, що значно перевищує показник 2023 року, який складав 62 млн. тонн. Основними драйверами зростання стали зернові та рудні вантажі, які забезпечили 60,3 млн. тонн і 18,5 млн. тонн відповідно. Зернові залишаються провідною статтею експорту, демонструючи стра-

тегічне значення України як глобального аграрного лідера [6, 7, 8].

Одним із найважливіших досягнень стало стабільне функціонування Українського морського коридору. Завдяки злагодженій роботі портів Великої Одеси та самовідданих робіт Військово-морських сил Збройних Сил України обсяги вантажообігу значно зросли у порівнянні з минулим роком (підсумки 2024 року: загальний вантажообіг – 79,9 млн. тонн; експорт – 76,4 млн. тонн до 52 країн світу; кількість суден – 3 138 суден скористалися маршрутом).

Дунайські порти відіграли ключову роль у підтримці експорту, перевантаживши 17,3 млн. тонн вантажів. Це підкреслює їхнє стратегічне значення для української економіки в умовах необхідності пошуку альтернативних логістичних маршрутів (рис. 1).

Відновлення вантажообігу стало можливим завдяки міжнародній підтримці, ефективній співпраці уряду, державних та приватних стивідорних компаній, аграріїв і всіх учасників логістич-

ного ланцюга. 2024 рік став роком, що продемонстрував силу спільних зусиль і здатність України долати виклики, зберігаючи стійкість і рухаючись до нових досягнень.

За оперативною інформацією АМПУ, у січні – червні 2025 року в морських портах було оброблено близько 40 млн. тонн вантажів, з яких 20,3 млн. тонн – це зернові, 9,3 млн. тонн – руди і 2,1 млн. тонн – чорні метали.

Зараз спостерігається певне падіння обсягів, але ті порти, які відкриті, працюють стабільно, незважаючи на постійні обстріли та складну ситуацію з безпекою. Скорочення експорту передусім пов'язано зі зменшенням урожаю та посівних територій країни внаслідок бойових дій та їх тимчасової окупації ворогом.

У 2024 році обсяги контейнерних перевезень у портах Одеси зросли на 77%, досягнувши 133 тис. TEU. У 2025 році цей тренд продовжується. Провідні глобальні оператори, такі як Maersk і MSC, відновили заходи суден до портів Великої Одеси. Зокрема, Maersk запустив новий

Таблиця 1

Портова галузь світу у 2030 році

Тенденції	Практична реалізація
1. Посилення уваги до просторової стратегії	Майбутні порти створюватимуть екосистеми на основі синергії між успішними існуючими кластерами як у місті, так і в порту. Майбутні порти стануть ще більшою рушійною силою інновацій і доходів для своїх міст.
2. Посилення протекціонізму	Менші порти можуть отримати вигоду від збільшення ближнього берега, оскільки вони можуть приймати менші та більші частоти плавання. Порти, які інвестуватимуть у вдосконалення своїх внутрішніх ланцюгів постачання, щоб підготуватися до цієї підвищеної складності, покращать свою конкурентну позицію.
3. Збільшення використання технологій	Добре захищені розумні порти мають конкурентну перевагу. Успішні порти інвестували в технологічний прогрес і їх безпеку, щоб забезпечити безпеку даних і операцій.
4. Зростаючі можливості на нішевих ринках	Швидше зростання інших вантажних і пасажирських перевезень призведе до підвищення інтересу приватних інвесторів до цих секторів. Порти пропонуватимуть більш різноманітну діяльність і більшу спеціалізацію.
5. Поява нових продуктових мереж	Великі інвестиції у відновлювану інфраструктуру дадуть портам конкурентну перевагу. Успішні порти включатимуть зелені екосистеми, щоб залишатися актуальними.
6. Використання альтернативних торгових шляхів	Нові порти розвиватимуться поруч із новими торговельними шляхами, що призведе до посилення економічних і геополітичних інтересів. Регіони, розташовані безпосередньо на цих маршрутах, отримають найбільший потенціал розвитку портів.
7. Посилення розробки стратегій для отримання нових конкурентних переваг	Розвинені порти використовуватимуть технологію та сталість як перевагу. Очікується, що порти, що розвиваються, спочатку зосередяться на інших викликах, таких як подальший розвиток і розширення базової портової інфраструктури. Очікується, що регіональні відмінності збільшаться ще більше.
8. Розширення співпраці	Очікується, що порти, які можуть створювати синергію кластерів, співпрацюватимуть, керуючись попитом на ефективність. Це вплине на звичайних учасників екосистеми, таких як суднові брокери та експедитори.

Джерело: розроблено авторами за матеріалами [14–15].

сервіс у жовтні 2024 року, що з'єднує Чорноморськ із портом Констанца (Румунія) та Порт-Саїд (Єгипет). Ці маршрути працюють під спеціальним страхуванням, а безпеку судноплавства забезпечують Військово-морські сили України та міжнародні партнери [7].

У 2025 році порт Чорноморськ активно розвивається як мультимодальний хаб, інтегруючи морські, залізничні та автомобільні перевезення. Контейнери, що прибувають до Чорноморська, можуть бути відправлені залізницею до внутрішніх логістичних центрів у Львові, Дякові чи Ковелі протягом 1-2 діб. Можливість концесія контейнерного терміналу в Чорноморську привернула увагу міжнародних інвесторів, таких як ННЛА (Німеччина), що може збільшити його пропускну спроможність до 600 тис. TEU на рік у перспективі.

Порт Південний відомий як глибоководний порт із можливістю приймати судна з осадкою до 14 м. У 2025 році він став майданчиком для експериментів із перевалкою високотехнологічних товарів, прийнявши судно з електромобілями. Цей порт також відіграє ключову роль у тимчасовому морському коридорі, обробивши у жовтні 2023 року балкер із 170 тис. тоннами залізної руди. Модернізація інфраструктури, зокрема оновлення кранів і впровадження IT-систем, сприяє підвищенню ефективності порту.

Разом з тим, ці показники відстають від показників довоєнного періоду. Основними причинами, які перешкоджають нормальній роботі портів в даний час є: мінування акваторії, обстріли російською федерацією об'єктів портової інфраструктури та плавзасобів, що призвели до їх

руйнування або пошкодження, інших активів та логістичної інфраструктури морських портів, складність проведення моніторингу стану акваторій морських портів внаслідок обстрілів держави-агресора та мінної небезпеки тощо.

Попри це українські порти зберігають операційну ефективність завдяки високому професіоналізму та стійкості працівників галузі. Ключовим завданням є забезпечення стабільності роботи портової системи. Паралельно ведеться активна робота над технічним оновленням флоту, цифровізацією процесів та підвищенням управлінської ефективності, що має забезпечити довгострокову стійкість галузі.

Стратегічною ціллю номер один НТС визначає відновлення та розвиток конкурентоспроможної та ефективної транспортної системи, інтегрованої до транс'європейської транспортної мережі (TEN-T), відповідно до стандартів ЄС [5].

Зокрема, це і відновлення зруйнованої інфраструктури портів. Яке має "за можливості" здійснюватися на якісно вищому рівні за принципом "build back better" – "відбудуй краще, ніж було". Відновлення портової інфраструктури, плавзасобів тощо вимагає значного обсягу ресурсів. Попередньо, вартість необхідного технічного оновлення оцінюється у десятки мільйонів євро. Втім, пріоритизація потреб недостатньо чітка.

Відновлення інфраструктури. На першому етапі профільне міністерство повинно проводити аналіз та пріоритизацію потреб у відновленні інфраструктури для подолання дефіциту пропускну спроможності. Зазначено, що це будуть "публічні інвестиційні проєкти".

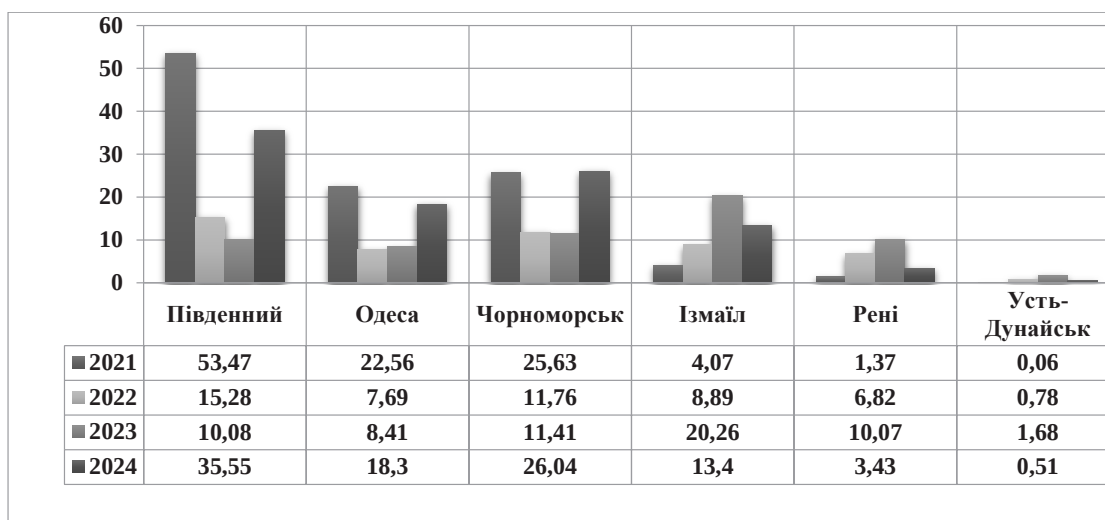


Рис. 1. Вантажообіг портів Великої Одеси та Дунайського регіону в 2021-2024 рр. млн.т [6]

Мається на увазі відновлення інфраструктури чорноморських портів. Однак, через невизначеність подальшого перебігу бойових дій, залишається незрозумілою доля Херсонського морського порту, який значно постраждав внаслідок окупації та затоплення. Чітких цифр щодо обсягу перевалки портів на цей термін не визначено: у операційному плані фігурує фраза "тенденція до зростання показника".

Концесії. Оперативний план передбачає концесію контейнерного терміналу, а також – залізнично-поромного комплексу у морському порту Чорноморськ вже на 2025 рік. Крім того, на 2027 рік мають бути, за планом, підготовані концесійні документи та проведено конкурс з визначення концесіонера пасажирського комплексу морського порту Одеса.

Підвищення конкурентоспроможності. Згідно з нинішнім документом, цього прагнуть досягти, зокрема, за рахунок "збалансування дивідендної політики, переходу до більш ефективної моделі управління портами з чітко розподіленими обов'язками між державними органами та приватним сектором тощо".

Про гармонізований розвиток припортової інфраструктури і пропускної спроможності портів йдеться вже з урахуванням розвитку інфраструктури Військово-морських Сил та прикордонної служби. І згадується забезпечення стійкості та живучості транспортної інфраструктури України перед актами агресії тощо "за рахунок розвитку основних та альтернативних маршрутів і впровадження електронних систем з високим ступенем захисту".

Посилення Дунайського кластеру. У документі говориться про збільшення потужності Дунайського морського кластера та створення в регіоні інфраструктури для збільшення обсягів вантажообігу через р. Дунай. Розвиток потужностей українських дунайських портів (Усть-Дунайськ, Ізмаїл та Рені) важливий для використання альтернативних маршрутів експорту української продукції до країн ЄС (або через них до третіх країн) в умовах руйнування, блокади та/або окупації частини морських портів.

Ці порти витримали значне навантаження у 2023 році, але у 2024 році обсяги перевалки знизилися. Між тим, саме від зацікавленості бізнесу у перевалці вантажів через Дунай залежить і активність держави у розвитку інфраструктури у регіоні (розширення залізничних підходів тощо).

Управління і кадри. Ще одна стратегічна ціль Стратегії сформована як "інституційна спроможність, людський капітал та ефективне управління у сфері транспорту". Втім, заходи, які прописані щодо цього напрямку, стосуються в основному синхронізації законодавства із законодавством ЄС.

Процес євроінтеграції портової галузі України буде продовжено за багатьма напрямками відповідно до стандартів ЄС. У зв'язку з цим особливий інтерес представляє Меморандум Європейської організації морських портів (ESPO) під назвою «Європа з нульовим рівнем викидів, розумна, стійка та конкурентоспроможна: порти Європи є частиною рішення», який визначає дев'ять пріоритетів розвитку європейських портів на 2024-2029 роки (табл. 2).

Таблиця 2

Пріоритети розвитку європейських портів на 2024-2029 рр.

Пріоритет	Зміст
1. Зосередження на впровадженні	Усунення неузгодженості та суперечливості політики для забезпечення ефективного впровадження чинних правил.
2. Реалізація ролі портів у розвитку відновлюваної енергетики	Залучення портів до розробки відповідної енергетичної політики, циклічної економіки та стратегій скорочення викидів вуглецю.
3. Скорочення викидів та забруднення	Укладення угоди про чітко визначений глобальний механізм ціноутворення на викиди парникових газів у морському секторі.
4. Забезпечення рівних умов конкуренції	Уникнення розбіжностей у національних підходах стимулювання галузей з нульовим рівнем викидів.
5. Забезпечення ключової ролі портів у зміцненні стійкості Європи	Вирішення проблеми іноземного впливу в портах – заходи безпеки ЄС мають не зупиняти торгівлю, а робити її безпечнішою.
6. Створення інтелектуального кіберсередовища	Реалізація додаткових заходів щодо посилення кібербезпеки та подальшої цифровізації у порту.
7. Залучення у порти необхідних інвестицій	Інвестування в проекти розвитку портів ЄС у розмірі 80 млрд доларів на найближчі 10 років.
8. Адаптація інституційної структури ЄС до нових реалій	Забезпечення більш комплексного підходу при розробці нової транспортної політики, постійного та прозорого діалогу між зацікавленими сторонами.
9. Укріплення ролі портів у співпраці з портовими містами	Ефективна співпраця між усіма зацікавленими сторонами для залучення нових підприємств та талантів у порт та портові міста.

Джерело: розроблено авторами за матеріалами [16–17].

Прикладом поглиблення співробітництва з відновлення та розвитку портової галузі може служити меморандум, який підписали у липні 2025 року під час міжнародної конференції URC у Римі Адміністрація морських портів України та Ukrainian Reconstruction Consortium.

Ключові переваги угоди – можливість залучення провідних італійських та європейських компаній до реконструкції портів, створення “розумних” портових систем з автоматизованим обробленням вантажів, інтеграція українських портів у європейську транспортну мережу TEN-T, сприяння отримання доступу до фінансування від ЄІБ, ЄБРР, Світового банку та європейських фондів, розвиток партнерства з європейськими портами та впровадження екологічних технологій.

Висновки. Оновлена Стратегія має актуалізувати чинну Національну транспортну стратегію України на період до 2030 року (НТС) з урахуванням викликів, які постали перед транспортною галуззю у зв’язку з повномасштабним вторгненням росії, та постануть в майбутньому в процесі відновлення транспортного комплексу. Це дає новий імпульс до реалізації ключових програмних

документів у сфері морського транспорту (Морської доктрини та Стратегії розвитку морських портів України), які були фактично зупинені.

Аналіз показників роботи портів у 2021-2024 роках та першому півріччі 2025 року показує, що в умовах постійної загрози з боку росії вони зберігають операційну ефективність.

Портова галузь України повинна розвиватися в рамках конкурентоспроможної та ефективної транспортної системи для подальшої інтеграції в Трансєвропейську транспортну мережу (TEN-T).

При цьому необхідно усвідомлювати, що до змін традиційного укладу світової портової галузі привів цілий комплекс демографічних, технологічних та екологічних факторів, які впливають на повсякденну діяльність та формують низку важливих тенденцій.

Розуміння основних тенденцій цього процесу для подальшого впровадження передового досвіду реалізації подібних проєктів, які випробували у портах по всьому світу, буде корисним для впровадження нових технічних і технологічних досягнень, обґрунтування напрямків і завдань до подальшої модернізації морських портів України.

Список літератури:

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках. Постанова КМ України від 27 грудня 2024 р. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text>.
2. Про затвердження Стратегії розвитку морських портів України на період до 2038 року. Розпорядження КМ України від 11 липня 2013 р. №548-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/548-2013%D1%80#Text>.
3. Про внесення змін до Морської доктрини України на період до 2035 року. Постанова КМ України від 18 грудня 2018 р. № 1108/ URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1108-2018-%D0%BF#Text>.
4. Проєкт Плану відновлення України. Матер. роб. групи «Відновлення та розбудова інфраструктури». URL: <https://>
5. Транспортна стратегія 2030. Яким бачать розвиток портової галузі. URL: https://cfts.org.ua/articles/transportna_strategiya_2030_yakim_bachat_rozvitok_portovo_galuzi_2089.
6. 2024 рік: 10 подій, які впливали на розвиток транспортної галузі України. Центр транспортних стратегій: веб-сайт. URL: https://cfts.org.ua/articles/2024_rik_10_podiy_yaki_vplivali_na_rozvitok_transportno_galuzi_ukrani_2081/144020.
7. Звіт про управління за 2024 рік – АМПУ. URL: <https://www.uspa.gov.ua/wp-content/uploads/2025/04/zvit-pro-upravlinnya.pdf>.
8. Кашуба А. Першочергові потреби на відновлення морської галузі оцінюються щонайменше у 550 млн євро. (2025) URL: rubric-economy/4008189-andrij-kasuba-zastupnik-ministra-rozvitku-gromad-ta-teritorij-ukraini.html.
9. Будник В.А., Шкуренко О.В. Перспективи розвитку інфраструктури портових терміналів України: монографія. Харків : Вид.-во Іванченка І. С., 2021. 125 с. URL: [files.duit.edu.ua > monographs > budnik-kravchenko-23-08-2024](https://files.duit.edu.ua/monographs/budnik-kravchenko-23-08-2024).
10. Корнійко Я., Валявська Н., Ушацький Р. Перспективи розвитку та аналіз сучасного стану портової галузі України. *Економіка та суспільство*. 2025. (76). URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-76-46>.
11. Решетков Д.М., Іванова І.М. Світовий досвід використання цифрових технологій у морських портах. *Транспортні системи і технології: проблеми функціонування та розвитку портів*. Том 6: монографія / за ред. О.В. Кириллової. Одеса: КУПІРІЄНКО СВ, 2021. 159 с.
12. Review of Maritime Transport 2020: UN Trade and Development (UNCTAD). URL: https://unctad.org/system/files/officialdocument/rmt2020_en.pdf.
13. Global Port Trends 2030 | Deloitte Netherlands. URL: <https://www.deloitte.com/ua/en/Industries/infrastructure/perspectives/infrastructure-interview-port-trends.html>.
14. Priorities of Europe's seaports for 2024-2029. URL: .

Reshetkov D.M., Larina I.M. PROBLEMS OF PORT INDUSTRY DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF THE UPDATED NATIONAL TRANSPORT STRATEGY OF UKRAINE UNTIL 2030

The study examines the main provisions of the updated National Transport Strategy of Ukraine until 2030. Its impact on the implementation of program documents for development in the field of maritime transport is analyzed, taking into account the challenges facing the seaports of Ukraine. It is noted that this document allows bringing the Strategy for the Development of Seaports of Ukraine until 2038 and the investment plans of the State Enterprise "Seaports Administration of Ukraine" in line with the National Transport Strategy. The key challenges that the industry has been facing since the beginning of the war are presented, as well as an analysis of port performance indicators in 2021-2024 and the first half of 2025. It is determined that the port industry should develop within the framework of a competitive and efficient transport system for further integration into the Trans-European Transport Network (TEN-T). It is emphasized that the preparation of an operational plan of measures for the implementation of the Strategy determines the relevance of theoretical awareness in the development of seaports in the world. It is proven that the changes in the traditional structure of the port industry were caused by a whole complex of demographic, technological and environmental factors that affect everyday activities and form a number of important trends. The need to adapt the national port system is substantiated not only by updating the infrastructure, regulatory framework and implementing digital solutions, but also by entering the system of cooperation within the international port community. It is concluded that understanding the main trends of this process for further implementation of best practices in the implementation of similar projects, which have been tested in ports around the world, will be useful for the development and modernization of seaports of Ukraine.

Key words: transport strategy of Ukraine, trends in the development of seaports, digital transformation.

Дата надходження статті: 19.09.2025

Дата прийняття статті: 01.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Хоботня Т.Г.

Національний транспортний університет

Рой М.П.

Національний транспортний університет

Пазич В.Л.

Національний транспортний університет

Кочкін І.А.

Національний транспортний університет

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ

У статті проаналізовано аспекти, які можуть залишатися поза увагою, проте без них неможливе ефективне функціонування транспортної системи. Йдеться про технічне забезпечення перевезень, яке виступає ключовим чинником гарантування безпеки як у міжнародних, так і в регіональних транспортних процесах. Технічне забезпечення міжнародних перевезень є важливою складовою міжнародної логістики та транспортної інфраструктури. Воно охоплює комплекс заходів і технологій, що забезпечують надійне, безпечне та ефективне переміщення товарів через державні кордони. У статті розглянуто ключові елементи технічного забезпечення: вибір транспортних засобів залежно від відстані, обсягів та вартості доставки; використання сучасних інформаційних технологій та систем управління логістикою; впровадження GPS-моніторингу для відстеження транспорту; безпекові стандарти і методи кріплення вантажів відповідно до європейських норм; розвиток складської та термінальної інфраструктури; транскордонну співпрацю в рамках міжнародних угод і гармонізацію стандартів; застосування екологічних технологій та принципів сталого розвитку. Особливу увагу приділено аспектам безпеки, що ґрунтуються на положеннях міжнародного стандарту EN 12195 та рекомендаціях IRU щодо кріплення вантажів. Розглянуто практичні приклади методів утримання вантажів – блокування, стяжні ремені, ланцюги, сітки, застосування протиковзних матеріалів. Показано вплив цих заходів на зменшення аварійності та підвищення ефективності міжнародних перевезень. Автори підкреслюють необхідність впровадження цифрових інновацій та екологічних технологій у технічному забезпеченні транспортного сектору України, що дозволить інтегруватися в європейський та світовий транспортний простір. Отримані результати можуть бути використані транспортними компаніями, митними органами та освітніми закладами при підготовці фахівців у сфері логістики та міжнародних перевезень.

Ключові слова: технічне забезпечення, міжнародні перевезення, логістика, транспортна безпека, GPS-моніторинг, екологічні технології, СЕК ООН.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток світової економіки і розширення міжнародної торгівлі призводять до зростання обсягів у міжнародних перевезеннях вантажів. В залежності від рівня технічного забезпечення транспортної системи утворюється безперервна робота транспортно-логістичної інфраструктури, оптимізуються витрати та підвищується безпека руху.

Комплекс елементів технічного забезпечення включають в себе: розвинену інфраструктуру;

рухомий склад, що відповідає нормам міжнародних перевезень; системи моніторингу для місцезнаходження вантажів; засоби для забезпечення безпеки під час транспортування; інформаційні та екологічні технології.

Ключового значення у міжнародних перевезеннях набуває стандартизація технічних вимог та узгоджене поєднання роботи всіх видів транспорту це дає можливість скорочення термінів доставки, забезпечує надійні

перевезення та знижує собівартість транспортування вантажів.

Розглянути питання технічного забезпечення міжнародних перевезень є важливим для розробки ефективного логістичного процесу, а також розвитку та функціонування транспортних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На сьогоднішній день у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі майже не представлено комплексних досліджень, присвячених безпосередньо технічному забезпеченню міжнародних перевезень. Це зумовлює актуальність подальших наукових пошуків у даному напрямі. Технічне забезпечення охоплює доволі великий сектор його елементів, які можна розглядати і досліджувати окремо. Саме тому в статті запропоновано попередній загальний огляд особливостей технічного забезпечення міжнародних перевезень вантажів автомобільним транспортом.

Метою статті є дослідити та вивчити особливості технічного забезпечення міжнародних перевезень, вказати роль транспорту, технічні елементи організації міжнародних вантажних перевезень, габаритно-ваговий контроль та обмеження, екологічні вимоги та системи навігації транспорту. А також з'ясувати значення транспортно-логістичних процесів у міжнародному масштабі для підвищення ефективності, безпеки та конкурентоспроможності.

Виклад основного матеріалу. Технічне забезпечення міжнародних перевезень – це сукупність технічних і технологічних елементів та організаційно-правових документів, які забезпечують виконання транспортного процесу у міжнародному сполученні, та включають в себе транспортні засоби, інфраструктуру, обладнання для навантажувально-розвантажувальних робіт та інші системи управління перевезеннями

Транспорт. Транспорт є основою в системі міжнародних перевезень, він забезпечує транспортування вантажів, створюючи основу для міжнародної торгівлі.

Для виконання міжнародних перевезень вимагається відповідність рухомого складу міжнародним вимогам. До кожного виду транспорту існують свої стандарти та вимоги, що прописані в міжнародних угодах. Зокрема, для автомобільного транспорту застосовується Женевська угода 1958 року. В цій угоді прийняті однакові умови офіційного затвердження та розроблені процедури атестації автотранспортних засобів, які контролюють системи нових автомобілів перед реєстрацією. Правила ЄЕК ООН, відомі як доповнення

до Угоди 1958 року застосовуються до обладнання і системи автомобілів. Вони повідомляють, що кожна країна, які приєдналась до угоди встановлює однакові вимоги до рухомого складу: по викидах, шинах, рульовому управлінню та інше. Вони постійно переглядаються, але застосовуються в європейських країнах добровільно.

Технічні параметри сучасних автомобілів, такі як надійність, безпечність, енергоємність, екологічність, за останні роки досягли високого рівня. Цьому посприяв технічний прогрес, а також існуючі в Європі законодавчі міри, що направлені на безпечність конструкцій автотранспортних засобів. Транспортні організації ЄЕК ООН, ЄС та Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) вивчають питання покращення автотранспортних засобів.

Технічні аспекти організації міжнародних вантажних перевезень. Безпека вантажів і транспортних засобів – ключовий елемент технічного забезпечення міжнародних перевезень. Вона включає стандарти обробки вантажів, застосування ефективних кріплень, балансування навантажень і контроль габаритно-вагових параметрів. Відповідне технічне оснащення забезпечує збереження вантажу під час руху, запобігає аваріям і нещасним випадкам.

Ефективність міжнародних автомобільних перевезень значною мірою залежить від рівня технічного забезпечення транспортного процесу. Йдеться не про стандарти безпеки та підготовку персоналу. Невірно закріплений вантаж становить загрозу як для самого товару, так і для водія, інших учасників дорожнього руху та навколишнього середовища. Тому у світовій практиці сформовано комплекс технічних і організаційних вимог, що дозволяють мінімізувати ризики під час транспортування.

Основу міжнародних стандартів становлять рекомендації IRU, засновані на європейській нормі EN 12195-1:2010. Вони регламентують допустимі сили прискорення, коефіцієнти тертя, вимоги до стінок кузова, контейнерів і фіксуючих елементів. Наприклад, бічні стінки вантажівок мають витримувати навантаження, що дорівнює 30-60 % від ваги вантажу, а задня стінка – до 40 % [1, с.18]. Це створює захисний каркас, який запобігає зсувам і перекиданню під час руху.

Не менш важливу роль відіграє пакування. Відповідно до положень Конвенції CMR, перевізник не несе відповідальності за пошкодження вантажу, якщо він був неналежно запакований. Тому сучасні пакувальні матеріали (стретч-плівка, сітки, бандажні стрічки) не лише захищають продукцію від погодних впливів, а й підсилюють

цілісність транспортної одиниці. Для великогабаритних машин чи обладнання застосовують індивідуальні платформи з жорсткими накриттями.

Технічне забезпечення перевезень охоплює також методи кріплення вантажів. Серед основних виділяють блокування, стяжку ремнями або ланцюгами, використання клинів, розпірних балок, протиковзних килимків тощо. У реальній практиці часто комбінують кілька способів, щоб рівномірно розподілити сили й знизити кількість кріплень. Наприклад, поєднання верхньої стяжки з базовим блокуванням дозволяє ефективно фіксувати вантаж навіть на довгих маршрутах.

Габаритно-ваговий контроль. Габаритно-ваговий контроль є ще однією важливою ланкою у забезпеченні безпеки дорожнього руху. Він спрямований на підвищення безпеки руху та збереження наших доріг. Перевантажені автотransпортні засоби (АТЗ) створюють значне навантаження на дорожнє полотно, що призводить до швидкого руйнування покриття, а також суттєво підвищують ризик аварій через зниження керованості АТЗ. Тому Кабінет Міністрів України підтримав постанову щодо лібералізації перевезень великогабаритних і великовагових вантажів, яким зокрема впроваджують європейські стандарти щодо габаритно-вагових обмежень (див. Рис. 1, 2) [2, с. 1].



Рис. 1. Максимальні значення фактичної маси для вантажівок



Рис. 2. Максимально допустимі значення фактичної маси для комбінованих вантажівок

Додаткові параметри:

- за висотою від поверхні дороги – 4 метри (для контейнеровозів – 4,35 м);
- за довжиною – 22 метри (для маршрутних ТЗ – до 25 м);
- за шириною – 2,6 метра.

Якщо хоча б за одним із наведених вище параметрів є перевищення норм, перевезення здійснюється за спеціальними правилами.

Для контролю запустити близько 100 майданчиків weight-in-motion (WIM) та посилити адміністративну відповідальність за перевантаження. Як наслідок, кількість порушень, у порівнянні з попередніми роками, знизилась у понад 30 разів.

WIM є модульною системою, що складається з апаратного та програмного забезпечення, а також комунікаційної інфраструктури (див. Рис. 3) [3, с. 1].

За мету системи зважування в русі є збір даних про масу і осьові навантаження транспортних засобів в реальному часі. Дані можуть використовуватися для контролю за перевищенням габаритно-вагових параметрів, а також для проектування доріг, моніторингу дорожнього руху, планування технічного обслуговування доріг, планування дорожнього руху і т.п.

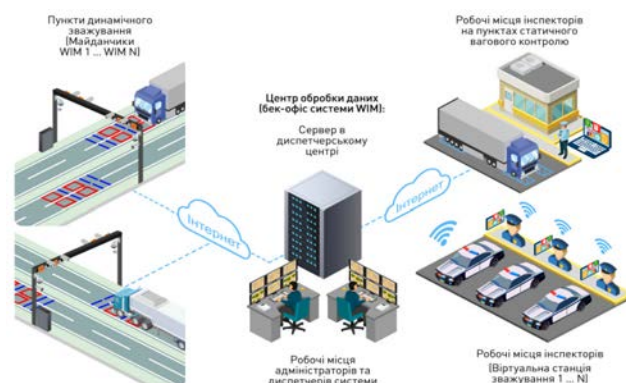


Рис. 3. Архітектура системи динамічного зважування

У цю систему швидкісного зважування АТЗ входять майданчики зважування в русі на високій швидкості, робочі місця інспекторів на наявних пересувних і стаціонарних пунктах вагового контролю, допоміжний офіс системи динамічного зважування (бек-офіс WIM), зокрема робочі місця диспетчерів і адміністраторів, а також системи передавання даних.

Екологічні вимоги до автотransпортних засобів. Боротьба із забрудненням атмосфери в останні роки набула глобального характеру. Для відновлення екологічного балансу та відшко-

дування збитків, яких завдає транспорт навколишньому середовищу, в межах Європейського Союзу передбачено справляння плати за користування транспортною інфраструктурою. Надходження повинні покривати витрати на утримання та видатки, пов'язані з ДТП, забрудненням атмосфери, шумом, перевантаженістю доріг. Це стосується всіх видів транспорту та всіх категорій користувачів (приватних і комерційних).

В Європейському Союзі введено жорсткі стандарти на токсичність і димність відпрацьованих газів. Деякі з них наведено в табл. 1.

Україна стала Договірною Стороною Женевської Угоди 1958 року згідно з Законом України від 20.02.2000р. №1448-111 і заявила про намір застосовувати на своїй території Правила ЄЕК ООН які є додатком до Женевської Угоди 1958 року і містять відповідні технічні приписи [4, с. 26].

Таблиця 1
Заходи щодо впровадження екологічних вимог

Правила ЄЕК ООН	Обмеження
R 9	Шум ДТЗ
R 24	Димність дизелів
R 40	Викиди забруднюючих речовин мотоциклами
R 41	Шум мотоциклів
R 47	Викиди забруднюючих речовин мопедами
R 49	Викиди забруднюючих речовин дизелями і газовими двигунами
R 51	Шум автомобілів
R 63	Шум мопедів
R 83	Викиди забруднюючих речовин автомобілями залежно від виду палива
R 103	Каталітичні нейтралізатори

Найбільш відомі Правила ЄЕК ООН №49 (інакше R49/02). Обмеження шуму автомобілів регламентується Правилами ЄЕК ООН №51.

Правило №49, містило такі обмеження по викидах шкідливих речовин у відпрацьованих газах дизелів: окису вуглецю; вуглеводнів; окислів азоту, твердих частинок та димності. Це Правило містить обмеження по токсичності і призначено перш за все для виробників автомобілів. Автомобіль має відповідати тим вимогам, які діють на момент його виробництва. Наприклад, якщо автомобіль було випущено в 1990 р., то він має задовольняти вимогам, які вступили в силу в 1988 році (Правило R-49.01, 1986-1990), оскільки саме вони діяли на той момент.

Шумність є окремою вимогою і не відноситься до стандартів «Євро». Правило № 51, що

діє з 1996 року, встановлювало обмеження рівня шуму для автомобілів загальною масою понад 3,5 т залежно від потужності двигуна. Для автомобілів із потужністю двигуна понад 150 кВт допустимий рівень шуму тоді не перевищував 80 дБА. На сьогоднішній день норми стали жорсткішими: для вантажівок середньої потужності (150–250 кВт) рівень шуму обмежується вже приблизно 77–78 дБА.

Отже, екологічні стандарти постійно «зростають», і ця тенденція є позитивною для нашого середовища. Проте цей процес є досить дорогим, і ми бачимо, як компанії на ринку виробництва автомобілів поступово виходять з нього, об'єднуються з іншими автовиробниками або ж починають орієнтуватися на виробництво електромобілів, які відповідають сучасним вимогам сталого розвитку.

Системи навігації та прилади контролю. При виконанні міжнародних перевезень обов'язково використовуються навігаційні системи, вони контролюють маршрут, визначають точне місцезнаходження автотранспортних засобів в реальному часі та забезпечують взаємодію між всіма учасниками процесу транспортування. GPS є найбільш поширеною супутниковою навігаційною системою. Від знання точного місцезнаходження автотранспортних засобів залежить, ефективність рішень, які приймають директори транспортних підприємств. Також існують спеціальні додатки, через які клієнти можуть слідкувати за перевезенням вантажу, що підвищує довіру до компанії.

Важливою є Європейська угода щодо роботи екіпажів транспортних засобів, які виконують міжнародні автомобільні перевезення (ЄУТР) 1976 рік. Угода застосовується до всіх автомобільних перевезень, вона містить вимоги, яких необхідно дотримуватись водію при транспортуванні вантажу. Встановлюється максимальна норма щоденного, тижневого та двотижневого керування АТЗ і безперервного відпочинку водія. Для контролю дотримання вимог ЄУТР використовують допоміжні бортові прилади контролю: тахографи – пристрій, призначений для контролю швидкості і пройденого шляху ТЗ, часу праці та відпочинку водія. Вмонтований у транспортний засіб, тахограф фіксує швидкість транспортного засобу і час його руху та простою.

Відповідно до Регламенту Європейського Парламенту і Ради (ЄС) №165/2014, цифрові тахографи повинні забезпечувати реєстрацію, зберігання та зчитування даних, а також їх захист від несанкціонованого доступу [4, с.1]. У цифрових тахографах інформація зберігається у внутріш-

ній пам'яті пристрою та на персональних картках водіїв. Ці дані включають відомості про діяльність транспортного засобу, водія.

Висновки. В статті представлено загальний огляд технічного забезпечення міжнародних перевезень вантажів автомобільним транспортом. Проведене дослідження показало, що результативність міжнародних автомобільних перевезень напряму пов'язана з рівнем технічного забезпечення. Вирішальне значення мають справність і сучасність рухомого складу, застосування навігаційних технологій для контролю та планування маршрутів, правильне закріплення і пакування вантажів, дотримання встановлених

габаритно-вагових обмежень і виконання екологічних норм. Важливим інструментом підвищення безпеки стали системи зважування в русі (WIM), що дозволили знизити кількість перевантажених транспортних засобів і тим самим поліпшити стан дорожньої інфраструктури. Уніфікація національних вимог із міжнародними стандартами відкриває Україні шлях до більш глибокої інтеграції у європейський транспортний простір. У перспективі пріоритетними залишаються впровадження «розумних» транспортних технологій, подальша цифровізація процедур контролю та пошук рішень, які зменшують шкідливий вплив автотранспорту на довкілля.

Список літератури:

1. Женевська угода 1958. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_e51#Text (дата звернення: 19.09.2025).
2. Компанія СЕА. WIM – системи динамічного зважування транспорту. Київ : Компанія СЕА. URL: <https://www.sea.com.ua/ua/weight-in-motion/> (дата звернення: 19.09.2025).
3. Міністерство розвитку громад та територій України. Україна переходить на європейські габаритно-вагові норми. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 17 лютого 2022. URL: <https://mindev.gov.ua/news/33466-ukrayina-perexodit-na-jevropeiski-gabaritno-vagovi-normi> (дата звернення: 19.09.2025).
4. Міжнародна асоціація автомобільного транспорту (IRU). International Guidelines on Safe Load Securing for Road Transport / IRU. Geneva : IRU, 2014. 76 с.
5. Регламент Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 165/2014. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_005-14#Text (дата звернення: 19.09.2025).

Khobotnia T.H., Roi M.P., Pazych V.L., Kochkin I.A. FEATURES OF TECHNICAL SUPPORT FOR INTERNATIONAL FREIGHT TRANSPORT BY ROAD

The article analyzes aspects that may remain overlooked but are essential for the effective functioning of the transport system. Specifically, it focuses on the technical support of transportation, which serves as a key factor in ensuring safety in both international and regional transport operations. Technical support for international freight transport is a crucial component of global logistics and transport infrastructure. It encompasses a set of measures and technologies aimed at ensuring reliable, safe, and efficient movement of goods across national borders. The article discusses the main elements of technical support, including: the selection of vehicles based on distance, cargo volume, and delivery cost; the use of modern information technologies and logistics management systems; the implementation of GPS monitoring for transport tracking; safety standards and cargo securing methods in accordance with European regulations; the development of warehouse and terminal infrastructure; cross-border cooperation within the framework of international agreements and standard harmonization; the adoption of environmentally friendly technologies and principles of sustainable development. Particular attention is paid to safety aspects based on the provisions of international standard EN 12195 and IRU recommendations on cargo securing. Practical examples of load restraint methods are analyzed, such as blocking, lashing straps, chains, nets, and the use of anti-slip materials. The impact of these measures on reducing accident rates and improving the efficiency of international transportation is demonstrated. The authors emphasize the need for the implementation of digital innovations and green technologies in the technical support of Ukraine's transport sector, which will facilitate integration into the European and global transport systems. The findings can be used by transport companies, customs authorities, and educational institutions involved in training specialists in logistics and international freight transport.

Key words: technical support, international transportation, logistics, transport safety, GPS monitoring, green technologies, UNECE.

Дата надходження статті: 26.09.2025

Дата прийняття статті: 13.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

УДК 519.832
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/43>

Хоботня Т.Г.
Національний транспортний університет

Стеценко І.А.
Національний транспортний університет

Мазорчук Т.В.
Національний транспортний університет

Бордюг Д.Р.
Національний транспортний університет

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЗАЛЕЖНО ВІД РІВНЯ КОЕФІЦІЄНТА ДОВІРИ ПІД ЧАС ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ТЕОРІЇ ІГОР З ПРИРОДОЮ

У статті, на основі комплексного аналізу, розглянуто залежність вибору оптимальної стратегії за критерієм Гурвіца від рівня коефіцієнта довіри при вирішенні задач теорії ігор з природою. Розглядається математичний апарат оцінки стратегій із застосуванням коефіцієнта довіри, що дозволяє врахувати індивідуальне суб'єктивне ставлення особи, яка приймає рішення, до ризику. У роботі представлено детальну методiku послідовних ітераційних розрахунків із послідовним зменшенням кроку обчислень для точного визначення граничних значень коефіцієнта довіри. Запропоновано підхід до аналізу впливу зовнішніх економічних умов на результати вибору оптимальної стратегії шляхом розгляду альтернативних умов задачі. Особливу увагу приділено вивченню характеру залежності між рівнем оптимізму особи, що приймає рішення, та обраною стратегією. У дослідженні описано процедуру багатоетапного аналізу чутливості результату до зміни суб'єктивних параметрів. Представлено детальний аналіз можливих варіантів вибору стратегії за різних умов. Робота містить повний опис методології поступового уточнення критичних параметрів за допомогою ітераційних процедур. Запропоновано комплексний підхід до оцінки стійкості результатів вибору стратегії при зміні вихідних умов задачі. Дослідження включає глибокий аналіз теоретичних аспектів застосування критерію Гурвіца при різних рівнях невизначеності та варіантах поведінки природи. Дослідження містить детальний опис процедури обчислення та аналізу показників ефективності стратегій за різних значень коефіцієнта довіри. Розглянуто питання адаптації критерію Гурвіца до умов ринкової невизначеності та коливань попиту. Робота включає аналіз можливостей вдосконалення методу шляхом комбінування з різними варіаціями зміни умов задачі. Розроблено концепцію багаторівневого аналізу результатів застосування критерію Гурвіца в умовах динамічного середовища.

Ключові слова: теорія прийняття рішень, прийняття рішень в умовах невизначеності, критерій Гурвіца, коефіцієнт довіри, оптимальна стратегія, аналіз залежності, закономірність.

Постановка проблеми. Теорія прийняття рішень в умовах невизначеності пропонує низку формальних методів для вибору оптимальних стратегій, серед яких особливе місце займає критерій Гурвіца. Цей критерій, будучи компромісом між крайнім песимізмом і оптимізмом, приймає до розгляду коефіцієнт довіри, який має враховувати суб'єктивне ставлення особи, що приймає рішення, до ризику. Однак саме ця суб'єктивна складова може бути джерелом проблеми значного

розриву між теоретичними передумовами критерію та його практичною ефективністю [1, с. 283].

Основна проблема полягає в структурній нестійкості рішень отриманих за допомогою критерію Гурвіца. Дослідження показують, що при певних умовах мінімальна зміна коефіцієнту довіри може призводити до різкої зміни оптимальної стратегії. Більш того існують ситуації коли деякі проміжні стратегії виявляються неефективними незалежно від значення коефіцієнту довіри,

що значно обмежує вибір альтернатив для особи, що приймає рішення. Ця нестійкість особливо критична в умовах динамічного середовища, коли зовнішні умови можуть різко змінюватися.

З наукової точки зору, дана проблема безпосередньо пов'язана з необхідністю подальшого розвитку апарату теорії прийняття рішень. Виникає потреба у дослідженні умов стійкості критерію Гурвіца, аналізі впливу структури матриці виграшів на характер залежності між коефіцієнтом довіри та оптимальною стратегією, а також розробці методів адаптації до реальних умов функціонування різних систем.

З практичної точки зору ненадійність результатів, отриманих за критерієм Гурвіца, становить серйозну перешкоду для його широкого впровадження в управлінську практику. Проблема удосконалення критерію Гурвіца безпосередньо з завданнями підвищення ефективності управління ризиками та адаптації бізнес-моделей до умов середовища в яких вони функціонують.

Таким чином поставлена проблема має комплексний характер, поєднуючи теоретичні аспекти розвитку математичного апарату теорії прийняття рішень в умовах невизначеності з практичною необхідністю отримання надійних результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні і практичні аспекти прийняття рішень в умовах невизначеності із застосуванням апарату теорії ігор з природою, були досліджені різними вітчизняними науковцями, серед яких Г. С. Прокудін, Н. Т. Кунда, І. М. Коваленко, А. В. Катренко.

Суттєвий вклад в розвиток даного підходу внесли зарубіжні вчені, зокрема О. Моргенштерн, Т. Сааті, Р. Акоф, Р. Черчмен, та ін.

Метою даної статті є дослідження, на конкретному прикладі, особливостей застосування критерію Гурвіца при виборі оптимальної стратегії в умовах невизначеності. Особлива увага приділяється аналізу впливу коефіцієнта довіри на вибір оптимальних стратегій. На практичному прикладі буде проведено комплексне дослідження залежності між рівнем оптимізму особи, що приймає рішення (коефіцієнт довіри) та вибором стратегії, з виявленням послідовності зміни рекомендованих рішень. Крім цього важливо також врахувати залежність між зміною умов задачі та характером впливу коефіцієнту довіри на вибір стратегії. Розглянемо, як погіршення чи поліпшення умов впливає на зміну вибору оптимальних стратегій та стабільність рішень отриманих із застосуванням критерію Гурвіца.

Виклад основного матеріалу. Ігри з природою як математичний апарат описують ситуації, в яких

особа що приймає рішення вступає в ігрові відносини з деякою абстрактною особою, яку умовно можна назвати «природою».

Відмінна особливість гри з природою складається в тому, що в ній свідомо діє тільки один з учасників, в більшості випадків званий Гравцем 1.

Гравець 2 (природа) свідомо проти Гравця 1 не діє, а виступає як такий, що не має конкретної мети і випадковим чином вибираючи чергові "ходи" партнер по грі.

Термін «природа» характеризує деяку об'єктивну дійсність, яку не треба розуміти буквально, це може бути величина попиту на товар чи послугу, рівень інфляції, зміни в законодавстві, тощо. В деяких випадках «Гравцем 2», дійсно може бути природа: погодні умови, природні та стихійні лиха. Загалом будь яку господарську діяльність людини можна розглядати як гру з природою.

Математична модель задач ігор з природою представляє собою матрицю виграшів, яку складають на основі інформації про виграші гравця при різних станах природи та про розподіл станів, якщо є така інформація. Ставиться задача: вибрати стратегію гравця, яка має перевагу над іншими стратегіями, при певних стратегіях природи, тобто при певних умовах задачі [2, с. 72-81].

Для знаходження оптимальної стратегії застосовують різні критерії вибору оптимального рішення. Якщо дуже бояться програти, використовують максимінний критерій Вальда. Минимаксний критерій Севіджа теж край песимістичний, але орієнтується на ризик. Коли немає інформації про обставини, в яких приймається рішення, застосовують нейтральний критерій Лапласа. Критерій Гурвіца передбачає більш урівноважений вибір між позицією крайнього песимізму та позицією крайнього оптимізму.

При застосуванні критерія Гурвіца обирають стратегію, у рядку якої стоїть найбільший елемент матриці Гурвіца. Коефіцієнт довіри α вибирають з суб'єктивних міркувань: чим небезпечніша ситуація і чим більше ми хочемо підстрахуватися, чим менша наша схильність до ризику, тим ближче α до нуля. Значення $\alpha = 0,5$ приймають за деяку «середню» точку зору. При впевненості в удачі α приймають близьким до одиниці.

Вирішальне правило для вибору оптимальної стратегії за критерієм Гурвіца має наступний вигляд:

$$H = \max_i [\alpha \times \max_j a_{ij} + (1 - \alpha) \times \min_j a_{ij}]$$

де, α – коефіцієнт довіри, $0 \leq \alpha \leq 1$

Ефективність критерію Гурвіца значною мірою залежить від структури матриці виграшів, оскільки він враховує лише критичні значення виграшів для кожної із запропонованих стратегій, ігноруючи її повний профіль ризику.

При виборі коефіцієнта довіри α постає питання впливу його значення на вибір оптимальної стратегії гравця в конкретно визначених умовах.

Умова: автотранспортне підприємство виконує перевезення вантажів від вантажовідправника до вантажоодержувача. Обслуговування одного автомобіля становить 20 тис. у.г.о. на місяць. За один місяць автомобіль приносить дохід 55 тис. у.г.о. Керівництво компанії може виділити АТЗ у кількості $X = 2, 3, 4$ (стратегії), а у залежності від попиту на перевезення вантажів автомобілем кількість АТЗ, яка може задовольнити потреби клієнтів $S = 1, 2, 3, 5$ (поведінка природи), заздалегідь невідома і залежить від багатьох випадкових факторів (пори року, погоди, святкових днів і т.д.). Якщо вантажоотримувачі потребують більшої кількості автомобілів, чим задіяла компанія, то вона може підвищити інтенсивність руху автомобілів на 10%, збільшуючи таким чином обсяги перевезень та дохід від них.

Умова збільшення інтенсивності руху АТЗ є важливою, оскільки вона частково компенсує втрати від малих потужностей підприємства, однак не повністю їх усуває, що формує специфічну структуру матриці виграшів.

Визначимо учасників гри, зокрема: гравець – автотранспортне підприємство; природа – попит на перевезення; стратегії гравця – кількість АТЗ яку може виділити компанія $X_i = (2, 3, 4)$; стратегія природи – необхідна кількість АТЗ яка невідома і може задовольнити попит на вантажні перевезення $S_j = (1, 2, 3, 5)$.

Побудуємо матрицю виграшів a_{ij} елементи якої – це різниця між очікуваним доходом та експлуатаційними затратами з урахуванням кількості АТЗ, яка визначає прибуток компанії.

	A	B	C	D	E	F
1		Дохід	55	110	165	275
2		S_j				
3	Витрати	X_i	1	2	3	5
4	-40	2	15	70	81	81
5	-60	3	-5	50	105	121,5
6	-80	4	-25	30	85	162

Рис. 1. Формування матриці виграшів

Для знаходження оптимальної стратегії за критерієм Гурвіца потрібно розрахувати значення елементів матриці Гурвіца h_{ia} для різних величин коефіцієнта довіри. До прикладу розрахунок для $\alpha = 0,2$

$$h_{1,\alpha=0,2} = 0,2 \times 81 + 0,8 \times 15 = 28,2 \rightarrow \text{MAX}$$

$$h_{2,\alpha=0,2} = 0,2 \times 121,5 + 0,8 \times (-5) = 20,3$$

$$h_{3,\alpha=0,2} = 0,2 \times 162 + 0,8 \times (-25) = 12,4$$

Всі інші розрахунки проведено автоматично в застосунку EXCEL.

	A	B	C	D	E	F	G	H
34	Матриця виграшів (за критерієм Гурвіца)					$\alpha * \max_j a_{ij} + (1 - \alpha) * \min_j a_{ij}$		
35		S_j						
36	X_i		1	2	3	5	$\alpha=0,2$	$\alpha=0,5$
37	2	15	70	81	81	81	28,2	48
38	3	-5	50	105	121,5	121,5	20,3	58,25
39	4	-25	30	85	162	162	12,4	68,5
40					max		28,2	68,5

Рис. 2. Визначення оптимальної стратегії за критерієм Гурвіца

Попередні розрахунки за критерієм Гурвіца показали, що при $\alpha=0,2$ оптимальною є стратегія X_1 , а при $\alpha = 0,5$ та $0,8$ – стратегія X_3 . Стратегія X_2 , в свою чергу не визначається оптимальною за жодних із прийнятих значень α .

Виникає закономірне питання, чи існують значення коефіцієнту довіри α за яких оптимальною буде стратегія X_2 , і як саме відбувається перехід між стратегіями при безперервній, послідовній зміні α . Дане питання має не лише теоретичний, але й практичний інтерес, оскільки воно, в пев-

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
43	Матриця виграшів (за критерієм Гурвіца)					$\alpha * \max_j a_{ij} + (1 - \alpha) * \min_j a_{ij}$									
44		S_j													
45	X_i		1	2	3	5	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,2$	$\alpha=0,3$	$\alpha=0,4$	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,6$	$\alpha=0,7$	$\alpha=0,8$	$\alpha=0,9$
46	2	15	70	81	81	81	21,6	28,2	34,8	41,4	48	54,6	61,2	67,8	74,4
47	3	-5	50	105	121,5	121,5	7,65	20,3	32,95	45,6	58,25	70,9	83,55	96,2	108,85
48	4	-25	30	85	162	162	-6,3	12,4	31,1	49,8	68,5	87,2	105,9	124,6	143,3
49					max		21,6	28,2	34,8	49,8	68,5	87,2	105,9	124,6	143,3

Рис. 3. Розрахунок оптимальної стратегії для $\alpha \in [0,1; 1]$

ній мірі, визначає стабільність та обґрунтованість рекомендацій, отриманих із застосуванням критерію Гурвіца. Якщо проміжна стратегія ні за яких умов не є оптимальною, це може вказувати як на її неефективність, так і на обмеженість самого критерію в заданих умовах [3, с. 383].

Для вирішення поставлених питань було проведено серію ітераційних розрахунків. Спочатку стратегії визначалися при значеннях коефіцієнту довіри α в діапазоні від 0,1 до 1 з кроком 0,1. Даний розрахунок дозволив отримати загальну картину залежності.

Результати показали, що при $\alpha \in [0,1; 0,3]$ оптимальною є стратегія X_1 , а при $\alpha \in [0,4; 1]$ – стратегія X_3 . Відповідно точка переходу між стратегіями X_1 – X_3 лежить в інтервалі між $\alpha = 0,3$ та $\alpha = 0,4$. Вже на даному етапі виявили, що стратегія X_2 є домінованою за критерієм Гурвіца, її розрахунковий показник ніколи не перевищує показників стратегій X_1, X_3 одночасно. Для більш точного визначення точки переходу та перевірки припущення про домінування було проведено розрахунки з кроком 0,01 для діапазону $\alpha \in [0,30; 0,40]$

Результати засвідчили аналогічну картину, перехід від стратегії X_1 до X_3 знаходиться в межах

$\alpha \in [0,33; 0,44]$. Стратегія X_2 знову не є оптимальною. На даному етапі можна зробити попередній висновок про те, що проміжна стратегія X_2 є менш ефективною за критерієм Гурвіца, не залежно від значення коефіцієнту довіри α . Для подальшого уточнення критичного значення коефіцієнту довіри α , було застосовано крок 0,001 в діапазоні $\alpha \in [0,331; 0,340]$.

В результаті розрахунків встановили, що критичне значення коефіцієнту довіри α при якому відбувається перехід між стратегіями X_1 – X_3 становить близько 0,331. Зауважимо, що навіть при високій точності розрахунків стратегія X_2 не була визнана оптимальною. Це підтверджує гіпотезу про її неефективність у рамках даної моделі. Фінальні розрахунки з кроком 0,0001 в діапазоні $\alpha \in [0,3301; 0,3310]$ підтвердили отриманий результат, з високою точністю.

Зміна оптимальної стратегії за критерієм Гурвіца при зміні коефіцієнту довіри α може відбуватися не поступово, без проміжного етапу, де була б оптимальною стратегія X_2 . Відповідно при заданій структурі матриці виграшів проміжна стратегія не є ефективною за критерієм Гурвіца

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
53	Матриця виграшів (за критерієм Гурвіца)					$\alpha * \max_j a_{ij} + (1 - \alpha) * \min_j a_{ij}$									
54	S_j														
55	X_i	1	2	3	5	$\alpha=0,31$	$\alpha=0,32$	$\alpha=0,33$	$\alpha=0,34$	$\alpha=0,35$	$\alpha=0,36$	$\alpha=0,37$	$\alpha=0,38$	$\alpha=0,39$	$\alpha=0,4$
56	2	15	70	81	81	35,46	36,12	36,78	37,44	38,1	38,76	39,42	40,08	40,74	41,4
57	3	-5	50	105	121,5	34,215	35,48	36,745	38,01	39,275	40,54	41,805	43,07	44,335	45,6
58	4	-25	30	85	162	32,97	34,84	36,71	38,58	40,45	42,32	44,19	46,06	47,93	49,8
59					max	35,46	36,12	36,78	38,58	40,45	42,32	44,19	46,06	47,93	49,8

Рис. 4. Розрахунок оптимальної стратегії для $\alpha \in [0,31; 0,4]$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
61	Матриця виграшів (за критерієм Гурвіца)					$\alpha * \max_j a_{ij} + (1 - \alpha) * \min_j a_{ij}$									
62	S_j														
63	X_i	1	2	3	5	$\alpha=0,331$	$\alpha=0,332$	$\alpha=0,333$	$\alpha=0,334$	$\alpha=0,335$	$\alpha=0,336$	$\alpha=0,337$	$\alpha=0,338$	$\alpha=0,339$	$\alpha=0,34$
64	2	15	70	81	81	36,846	36,912	36,978	37,044	37,11	37,176	37,242	37,308	37,374	37,44
65	3	-5	50	105	121,5	36,8715	36,998	37,125	37,251	37,378	37,504	37,631	37,757	37,884	38,01
66	4	-25	30	85	162	36,897	37,084	37,271	37,458	37,645	37,832	38,019	38,206	38,393	38,58
67					max	36,897	37,084	37,271	37,458	37,645	37,832	38,019	38,206	38,393	38,58

Рис. 5. Розрахунок оптимальної стратегії для $\alpha \in [0,331; 0,34]$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
70	Матриця виграшів (за критерієм Гурвіца)					$\alpha * \max_j a_{ij} + (1 - \alpha) * \min_j a_{ij}$									
71	S_j														
72	X_i	1	2	3	5	$\alpha=0,3301$	$\alpha=0,3302$	$\alpha=0,3303$	$\alpha=0,3304$	$\alpha=0,3305$	$\alpha=0,3306$	$\alpha=0,3307$	$\alpha=0,3308$	$\alpha=0,3309$	$\alpha=0,3400$
73	2	15	70	81	81	36,7866	36,7932	36,7998	36,8064	36,813	36,8196	36,8262	36,8328	36,8394	37,44
74	3	-5	50	105	121,5	36,7577	36,7703	36,78295	36,7956	36,80825	36,8209	36,8336	36,8462	36,8589	38,01
75	4	-25	30	85	162	36,7287	36,7474	36,7661	36,7848	36,8035	36,8222	36,8409	36,8596	36,8783	38,58
76					max	36,7866	36,7932	36,7998	36,8064	36,813	36,8222	36,8409	36,8596	36,8783	38,58

Рис. 6. Розрахунок оптимальної стратегії для $\alpha \in [0,3301; 0,3310]$

шому зростанні впевненості гравця α – оптимальною є стратегія X_3 . Відповідно в умовах вищої рентабельності проміжна стратегія X_2 знаходить своє місце для певного діапазону α . Поліпшення фінансових показників змінює структуру матриці виграшів таким чином, що стратегія X_2 перестає бути домінованою і стає оптимальною для гравця із середнім рівнем оптимізму та впевненості в ситуації. Це важливе заключення яке свідчить про те, що рекомендації за критерієм Гурвіца сильно залежать від абсолютних значень виграшів.

При погіршенні умов (дохід становить 45 тис.у.г.о.) результати розрахунків за критерієм Гурвіца при значенні коефіцієнту довіри α в діапазоні від 0,1 до 1 з кроком 0,1 повертаються до вихідної закономірності.

Подальші розрахунки з більшою точністю, відповідно меншим кроком (0,01, 0,001, 0,0001) підтвердили вихідні результати. Стратегія X_2 не є оптимальною а перехід від X_1 до X_3 відбувається не поступово при $\alpha \approx 0,331$. Присутня симетричність впливу, за якою зниження доходу повертає систему фактично до вихідного стану, де проміжна стратегія не є ефективною за жодного значення α .

Залежність вибору оптимальної стратегії за критерієм Гурвіца від коефіцієнта довіри α не завжди є послідовною. Характер даної залежності суттєво залежить від вихідних параметрів задачі, що в свою чергу підкреслює важливість аналізу рівня чутливості рішення до суб'єктивного параметра α та врахування конкретних економічних умов при застосуванні критерія Гурвіца для прийняття управлінських рішень. Обмеженість кри-

терію Гурвіца, впливає з моменту ігнорування цілісного профілю ризику стратегії концентруючись лише на її граничних результатах [4, с. 408].

Висновки. За результатами проведених розрахунків вибору оптимальної стратегії в умовах невизначеності за критерієм Гурвіца встановили, що залежність між рівнем коефіцієнту довіри та оптимальною стратегією має нелінійний характер і за певних умов може проявитися у вигляді різких змін оптимального рішення. Це може вказувати на структурну нестійкість критерію Гурвіца в умовах, коли деякі проміжні стратегії виявляються неефективними незалежно від рівня довіри особи, що приймає рішення.

Особливого значення набуває вплив умов на результати застосування критерію. Дослідження показало, що зміна умов суттєво впливає на характер залежності між коефіцієнтом довіри та оптимальною стратегією. Поліпшення умов призвело до більш плавного та поступового переходу між стратегіями, тоді як погіршення зберігає різку динаміку зміни рішень.

Для практичного застосування критерію Гурвіца слід проводити попередній аналіз чутливості рішення до зміни коефіцієнта довіри. У разі виявлення різкої залежності є доцільним розглянути можливість застосування альтернативних критеріїв або комбінованого підходу. Важливо також періодично перераховувати оптимальні стратегії при зміні умов в яких приймається рішення.

Отримані результати вказують на доцільність індивідуального підходу до вибору параметрів критерію Гурвіца для кожного конкретного випадку його застосування.

Список літератури:

1. Прокудін Г.С., Хоботня Т.Г., Третиниченко Ю.О., Коп'як Н.В. Застосування змішаних стратегій при управлінні міжнародними вантажними перевезеннями. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. Вип. 1 (48). 2021. С. 283–292.
2. Кунда Н.Т. Дослідження операцій у транспортних системах. Навчальний посібник для студентів напряму «Транспортні технології» вищих навчальних закладів. К.: Видавничий дім «Слово», 2008. 400 с.
3. Хоботня Т.Г., Мазорчук Т.В., Стеценко І.А. Аналіз залежності результатів дослідження від рівня коефіцієнту довіри при вирішенні задач теорії ігор. *LXXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*: Тези доповідей. К.: НТУ. 2023. С. 383.
4. Хоботня Т.Г., Мазорчук Т.В., Стеценко І.А. Аналіз залежності результатів дослідження від впливу різних факторів при вирішенні задач теорії ігор з природою. *Ювілейна наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*: Тези доповідей. К.: НТУ. 2024. Вип. 80. С. 408.

Khobotnia T.H., Stetsenko I.A., Mazorchuk T.V., Bordiuh D.R. OPTIMAL STRATEGY SELECTION BASED ON THE CONFIDENCE COEFFICIENT IN DECISION-MAKING PROBLEMS IN GAMES AGAINST NATURE

This paper, based on a comprehensive analysis, examines the dependence of the optimal strategy selection according to the Hurwitz criterion on the confidence level coefficient in game theory problems. The mathematical framework for evaluating strategies using the confidence coefficient is considered, which allows for accounting for the individual subjective risk attitude of the decision-maker.

The study presents a detailed methodology of sequential iterative calculations with a progressively decreasing computation step to accurately determine the threshold values of the confidence coefficient. An approach is proposed for analyzing the impact of external economic conditions on the results of optimal strategy selection by considering alternative problem scenarios.

Particular attention is paid to investigating the nature of the relationship between the decision-maker's level of optimism and the chosen strategy. The research describes a procedure for multi-stage sensitivity analysis of the outcome to changes in subjective parameters.

A detailed analysis of possible strategy choices under various conditions is provided. The work contains a complete description of the methodology for the gradual refinement of critical parameters using iterative procedures. A comprehensive approach is proposed for assessing the stability of strategy selection results when the initial problem conditions change. The investigation includes an in-depth analysis of the theoretical aspects of applying the Hurwitz criterion under different levels of uncertainty and variants of nature's behavior. The study provides a detailed description of the procedure for calculating and analyzing strategy performance indicators for different values of the confidence coefficient. The issue of adapting the Hurwitz criterion to conditions of market uncertainty and demand fluctuations is considered.

The work analyzes possibilities for improving the method by combining it with various modifications of changing problem conditions. A concept for a multi-level analysis of the results of applying the Hurwitz criterion in a dynamic environment is developed.

Key words: *decision theory, decision-making under uncertainty, Hurwicz criterion, confidence coefficient, optimal strategy, sensitivity analysis, uncertainty modeling, strategic robustness.*

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 15.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Холодний Ю.Ф.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

Поліщук Д.В.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

Алтухов П.М.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

Жовтобрюх В.О.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРИВОДІВ У КОНСТРУКЦІЇ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ТРАНСПОРТУ

Досліджено перспективи впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованих автомобілів, зокрема кар'єрних самоскидів, військових бронетранспортерів та великовантажних вантажівок, з урахуванням сучасних технологічних тенденцій та експлуатаційних вимог. Встановлено, що традиційні гідравлічні приводи мають обмеження щодо швидкості реакції, рівномірності розподілу гальмівного зусилля та енергоефективності, що знижує їх ефективність у змінних умовах експлуатації. Метою статті є дослідження потенціалу впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованих автомобільних транспортних засобів та оцінювання їх результативності щодо покращення безпеки, експлуатаційної надійності та енергоефективності.

Методи дослідження включають моделювання динаміки гальмування в середовищі MATLAB/Simulink, аналіз експлуатаційних характеристик традиційних та інтелектуальних систем і експериментальне оцінювання рівня зносу компонентів, стабільності гальмування й енергоефективності. Проведено порівняльний аналіз швидкості реакції приводів, ступеня рівномірності навантаження на гальмівні механізми та адаптивності системи до зміни дорожніх умов і навантаження.

Отримано результати, які підтверджують, що використання інтелектуальних гідравлічних приводів дозволяє значно знизити знос гальмівних колодок, забезпечити стабільність гальмування навіть у складних дорожніх умовах та підвищити енергоефективність завдяки адаптивному керуванню тиском. Виявлено, що основними бар'єрами для широкого впровадження цієї технології є технічні труднощі інтеграції, висока вартість обладнання та обслуговування, а також невизначеність нормативно-правового регулювання.

Запропоновано заходи щодо усунення виявлених проблем, зокрема впровадження модульної архітектури гальмівних систем, використання сенсорних технологій для контролю гальмівного процесу в режимі реального часу і розроблення нових регламентів сертифікації інтелектуальних приводів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням алгоритмів прогнозування зносу гальмівних механізмів, методів адаптивного керування тиском та розробленням стратегій інтеграції таких приводів у автомобільні транспортні платформи нового покоління.

Ключові слова: гальмівна система автомобіля, адаптивне гальмування, енергоефективність, автоматизоване керування, сенсорні технології, зносостійкість, оптимізація тиску, інтеграція інтелектуальних систем.

Постановка завдання. Таким чином, сучасні умови експлуатації спеціалізованих автомобільних транспортних засобів вимагають підвищення ефективності та надійності їхніх гальмівних систем, що зумовлено зростанням навантажень, необхідністю забезпечення безпеки руху в складних умовах та відповідністю актуальним вимогам до енергоефективності. Традиційні гальмівні системи, що використовують механічні або пневматичні приводи, мають низку обмежень, пов'язаних із затримками в реакції, зношенням компонентів і потребою в частому технічному обслуговуванні. Натомість використання інтелектуальних гідравлічних приводів відкриває нові можливості для покращення параметрів гальмування, оскільки такі системи забезпечують адаптивне керування тиском, швидке реагування на зміну дорожніх умов і автоматизоване коригування гальмівних зусиль. Інтеграція сучасних сенсорних технологій і алгоритмів штучного інтелекту дозволяє в режимі реального часу аналізувати стан дорожнього покриття, динаміку руху автомобіля та оптимізувати роботу гальмівної системи, що є особливо важливим для спеціалізованих транспортних засобів, які функціонують у складних умовах – таких як кар'єрні самоскиди, військові бронемашини чи великовантажні вантажівки. Запровадження таких рішень потребує комплексного аналізу можливих технічних реалізацій, дослідження ефективності роботи інтелектуальних гідравлічних приводів у реальних умовах експлуатації, а також оцінювання економічної доцільності їх застосування. Важливим науковим завданням є розроблення математичних моделей та алгоритмів управління, які дозволять оптимізувати роботу системи, забезпечити її адаптивність до змінних умов і зменшити енергетичні втрати. З практичного погляду впровадження таких приводів сприятиме підвищенню безпеки руху, зниженню експлуатаційних витрат і збільшенню ресурсу гальмівних систем, що є критично важливим для підвищення ефективності автомобільного транспорту спеціального призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження підтверджують, що інтелектуальні гідравлічні приводи гальмівних систем спеціалізованого транспорту спрямовані на підвищення ефективності гальмування, точності розподілу гальмівних зусиль та інтеграції з електронними системами керування. Основні напрями охоплюють алгоритмічні підходи до контролю гальмівних процесів, адаптацію електрогідравлічних систем до сучасних вимог безпеки, опти-

мізацію їх продуктивності та оцінювання ефективності в реальних умовах експлуатації.

Перший напрям досліджень присвячено розробленню алгоритмічного керування гідравлічними приводами. Ц. Ху (C. Hu), Г. Пан (G. Pan), Л. Конг (L. Kong) та Дж. Ю (J. Yu) [1] розглядають Brake-by-Wire як основу для подальшого вдосконалення гальмівних систем, що забезпечує швидке регулювання гальмівного зусилля. Л. Янг (L. Yang), Ю. Янг (Y. Yang), Г. Ву (G. Wu), Кс. Чжао (X. Zhao), С. Фанг (S. Fang), Кс. Ляо (X. Liao), Р. Ванг (R. Wang) і М. Чжанг (M. Zhang) [2] аналізують автономне екстрене гальмування, наголошуючи на необхідності покращення технологій адаптивного контролю. М. Ватані (M. Watany) [3] оцінює стратегії контролю проковзування для гідравлічних систем, що покращують стабільність транспортних засобів.

Д. Таверніні (D. Tavernini), Ф. Вакка (F. Vacca), М. Мецлер (M. Metzler), Д. Савіцький (D. Savitski), В. Іванов (V. Ivanov) та П. Грубер (P. Gruber) [4] досліджують можливості нелінійного прогнозуючого регулятора ABS для електрогідравлічних систем, що дозволяє покращити адаптацію гальмування до змінних дорожніх умов. Подальші дослідження мають бути зосереджені на інтеграції алгоритмів машинного навчання для прогнозування та адаптації гальмівного процесу.

Другий напрям наукових праць містить дослідження комбінованих електромагнітно-гідравлічних систем. К. Чжанг (K. Zhang), Х. Шанг (H. Shang), Дж. Ксю (J. Xu), Дж. Ніу (J. Niu) та Ю. Юйе (Y. Yue) [5] оцінюють можливості інтеграції електромагнітного та гідравлічного ретардера для зниження зношування гальмівних компонентів. В. Хан (W. Han), Л. Ксьонг (L. Xiong) та З. Ю (Z. Yu) [6] пропонують методи оцінювання та регулювання гальмівного тиску з урахуванням нелінійностей системи, а В. Хан (W. Han), Л. Ксьонг (L. Xiong) та З. Ю (Z. Yu), Г. Чжуо (G. Zhuo), Б. Ленг (B. Leng) та С. Ксю (S. Xu) [7] розробляють підхід до контролю тиску, що враховує динаміку актуаторів. Важливою подальшою задачею є розроблення більш ефективних механізмів компенсації коливань тиску для забезпечення стабільності системи в екстремальних умовах.

Третій напрям присвячено ефективності електрогідравлічних систем. В. Хан (W. Han), Л. Ксьонг (L. Xiong) та З. Ю (Z. Yu) [8] досліджують нові методи злиття керуючих сигналів для оптимізації роботи гальмівних контурів. Ю. Джи (Y. Ji), Дж. Чжанг (J. Zhang), Ц. Хе (C. He), Кс. Хой (X. Hou), В. Лю (W. Liu) та Дж. Хан (J. Han)

[9] розглядають систему центрального підсилювача, що покращує динаміку гальмування. К. Танг (Q. Tang), Ю. Янг (Y. Yang), Ц. Люо (C. Luo), Ц. Янг (Z. Yang) та Ц. Фу (C. Fu) [10] пропонують стратегію комбінованого гальмування для електромобілів, що поєднує можливості двомоторного приводу з гідравлічними контурами. Подальші дослідження мають зосередитися на адаптації таких стратегій до важких умов експлуатації спеціалізованого транспорту.

Четвертий напрям досліджень передбачає координацію гальмівного моменту та використання рекуперативних технологій. Ц. Чжоу (Z. Zhou), Кс. Їн (X. Yin) та Дж. Чжанг (J. Zhang) [11] аналізують розподілене керування гальмівним моментом в електромобілях, звертаючи увагу на точність координації електродвигунів і гідравлічних приводів. Дж. Надео (J. Nadeau), П. Мішео (P. Micheau) та М. Босверт (M. Boisvert) [12] досліджують колаборативний підхід до управління подвійною електрогідравлічною рекуперативною системою. Кс. Чжао (X. Zhao), Л. Ксіонг (L. Xiong), Г. Чжуо (G. Zhuo), В. Тіан (W. Tian), Дж. Лі (J. Li), К. Шу (Q. Shu), Кс. Чжао (X. Zhao) та Г. Ксю (G. Xu) [13] аналізують архітектуру One-Box електрогідравлічних систем, оцінюючи їх перспективи у сфері електротранспорту. Важливим напрямом подальших досліджень є адаптація цих технологій для важкого транспорту з урахуванням високих навантажень та складних експлуатаційних умов.

Аналіз підтверджує, що інтелектуальні гідравлічні приводи мають значний потенціал для підвищення ефективності та безпеки спеціалізованого транспорту. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію адаптивних алгоритмів, інтеграцію з комплексними системами керування та оцінювання реальної продуктивності в умовах експлуатації.

Незважаючи на активний розвиток адаптивних гальмівних систем, залишається низка нерозв'язаних питань, які ускладнюють широке впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів. Недостатньо досліджено архітектурні особливості цих приводів у специфічних експлуатаційних умовах, що обмежує їх адаптацію до різних типів спеціалізованого транспорту. Відсутня розширена емпірична база для порівняння ефективності управління тиском та швидкістю реакції таких приводів із традиційними системами, що не дозволяє об'єктивно оцінити стабільність їх роботи в умовах високих навантажень. Не визначено чітких підходів до оцінювання впливу

адаптивного керування на знос гальмівних компонентів та енергоефективність, що ускладнює прогнозування довготривалих експлуатаційних характеристик.

Технічні, економічні та регуляторні аспекти також залишаються проблемними. Інтелектуальні приводи потребують складної інтеграції з наявними транспортними платформами, а висока вартість їх впровадження та обслуговування обмежує можливості комерційного використання. Відсутність єдиних стандартів для сертифікації таких систем ускладнює їх масове впровадження та промислову адаптацію. Запропоноване дослідження сприятиме розв'язанню цих питань шляхом розширення емпіричної бази, розроблення адаптивних алгоритмів керування тиском і створення науково обґрунтованих рекомендацій для підвищення ефективності та надійності інтелектуальних гідравлічних приводів.

Метою статті є аналіз можливостей застосування інтелектуальних гідравлічних приводів у конструкції гальмівних систем спеціалізованого транспорту та оцінювання їх ефективності з огляду на підвищення безпеки, надійності та енергоефективності.

Для досягнення цієї мети поставлено такі **завдання**:

- дослідити архітектуру та принципи роботи інтелектуальних гідравлічних приводів, оцінити їх ефективність у порівнянні з традиційними системами;
- визначити вплив адаптивного керування на знос компонентів, стабільність гальмування та енергоефективність, а також основні бар'єри впровадження;
- розробити рекомендації щодо інтеграції інтелектуальних гідравлічних приводів з урахуванням сучасних технологій та експлуатаційних вимог.

Виклад основного матеріалу. Інтелектуальні гідравлічні приводи є ключовим елементом сучасних гальмівних систем спеціалізованого транспорту, оскільки поєднують високу точність регулювання тиску з можливістю адаптивного керування. Вони відрізняються від традиційних гідравлічних приводів наявністю вбудованих сенсорів, електронних контролерів та алгоритмів штучного інтелекту, що дозволяє динамічно коригувати гальмівні характеристики залежно від умов експлуатації. Основними функціональними перевагами таких приводів є зменшення часу відгуку, оптимізація розподілу гальмівного зусилля, покращена адаптація до змінного навантаження та

автоматичне налаштування параметрів у режимі реального часу. У спеціалізованому транспорті, як-от кар'єрна техніка, військові транспортні засоби або великовантажні комерційні машини, застосування інтелектуальних гідравлічних приводів дозволяє підвищити стійкість і керованість, що є критичним фактором для безпечної експлуатації у складних умовах (табл. 1).

Сучасні інтелектуальні гідравлічні приводи знаходять практичне застосування в транспортних засобах, що працюють в екстремальних умовах. Наприклад, у кар'єрних самоскидах Caterpillar 797F [14] використовується адаптивна система гальмування, яка враховує зміну навантаження та рельєфу, що дозволяє рівномірно розподіляти гальмівні зусилля між колесами. Це зменшує знос гальмівних колодок і покращує керованість на нерівній місцевості. У військових бронетранспортерах Patria AMV [15] реалізовано автоматичне коригування гальмівного тиску залежно від динаміки маневру, що особливо важливо в разі швидкісних розворотів та різких змін напрямку руху. Аналогічно у вантажівках Volvo FH [16] застосовується електронно-керований гідравлічний привід, що регулює гальмівне зусилля на кожній осі відповідно до завантаженості автомобіля, що зменшує ризик заносу за гальмування на слизьких дорогах. Використання таких рішень значно покращує безпеку експлуатації спеціалізованого транспорту та сприяє зниженню витрат на технічне обслуговування.

З метою порівняння ефективності управління тиском і швидкістю реакції традиційних та інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівних системах спеціалізованого транспорту було про-

ведено експеримент. Для цього в симуляційному середовищі були змодельовані умови гальмування, що дозволило отримати кількісні показники часу реакції, точності регулювання тиску та адаптивності до змінного навантаження.

Експеримент проводився на основі моделювання динаміки гальмування кар'єрного самоскида Caterpillar 797F, військового бронетранспортера Patria AMV XP та вантажного автомобіля Volvo FH, які представляють три категорії спеціалізованих автомобільних засобів із різними умовами експлуатації. Для дослідження використовувалося комп'ютерне середовище MATLAB/Simulink [17] із застосуванням моделей гідравлічних приводів, що дозволяє враховувати реалістичні фізичні параметри, зокрема масу транспортного засобу, тиск у гальмівній системі, коефіцієнт зчеплення з дорожньою поверхнею.

Експериментальні умови включають три основні сценарії:

1. Гальмування на рівній сухій дорозі – оцінювання швидкості реакції та стабільності тиску;
2. Гальмування на мокрій та слизькій поверхні – аналіз адаптивності системи до зміни зчеплення;
3. Гальмування за змінного навантаження – тестування здатності до оптимізації розподілу гальмівного зусилля.

Для кожного сценарію оцінювалися такі параметри: середній час реакції системи на зміну умов, рівень коливань тиску в гальмівних механізмах та адаптивність приводу до зміни навантаження (табл. 2).

На рисунку 1 представлено результати моделювання в MATLAB/Simulink, які демонструють

Таблиця 1

**Функціональні компоненти інтелектуальних гідравлічних приводів
у гальмівних системах спеціалізованого транспорту**

Електронний блок керування (ECU)	Аналізує дані сенсорів і коригує тиск у приводі	Підвищена точність регулювання, швидкий відгук на зміну умов
Сенсорні модулі	Вимірюють швидкість коліс, тиск у системі, зусилля гальмування	Мінімізують ризик пробуксовування, підвищують стабільність гальмування
Гідравлічний насос з електронним регулюванням	Забезпечує підтримку необхідного тиску залежно від команд ECU	Знижує енергоспоживання, забезпечує оптимальний розподіл гальмівних зусиль
Програмне забезпечення для аналізу даних	Оптимізує алгоритми роботи приводу залежно від дорожніх умов	Покращує адаптацію системи до змінного навантаження
Виконавчі механізми (гідроциліндри, клапани)	Реалізують зміну тиску для регулювання гальмівного зусилля	Підвищують довговічність механізмів, зменшують втрати енергії

Джерело: сформовано авторами на підставі [1; 2; 3, с. 8–9; 6, с. 724–727; 7, с. 200].

перевагу інтелектуальних гідравлічних приводів у швидкості реагування та стабільності гальмівного тиску порівняно з традиційними системами.

Експериментальні дані свідчать про значну перевагу інтелектуальних гідравлічних приводів над традиційними в аспекті часу реакції, точності регулювання тиску та адаптації до змінних умов експлуатації. Отримані значення часу реакції демонструють, що традиційні приводи мають значно більшу затримку через механічний характер регулювання, тоді як інтелектуальні системи забезпечують швидке коригування тиску завдяки використанню сенсорів та електронного керування. Зокрема, на сухій дорозі час спрацювання інтелектуальних приводів у середньому втричі коротший, що дозволяє мінімізувати гальмівний шлях та підвищити безпеку.

Аналіз поведінки системи на слизькій дорозі виявив, що традиційні приводи демонструють значні затримки та нерівномірність розподілу гальмівного зусилля, що може призводити до блокування коліс і втрати контролю. Водночас інтелектуальні системи завдяки адаптивному управлінню тиском дозволяють утримувати стабільний рівень гальмування без різких коливань, що суттєво підвищує ефективність роботи приводу в складних дорожніх умовах.

Ще одним важливим аспектом є адаптація до змінного навантаження. У традиційних системах відсутня можливість миттєвого перерозподілу гальмівного зусилля між колесами залежно від поточного стану навантаження. В експерименті було відзначено, що за наявності нерівномірного навантаження на осі традиційні приводи

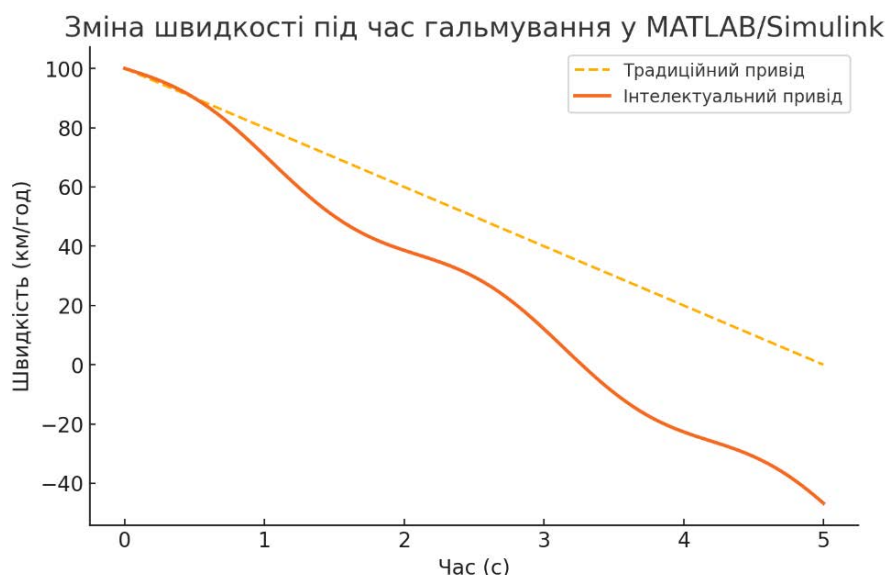


Рис. 1. Динаміка зміни гальмівного тиску у традиційних та інтелектуальних гідравлічних приводах за результатами моделювання в MATLAB/Simulink

Джерело: власна розробка авторів.

Таблиця 2

Результати експериментального аналізу ефективності управління тиском і швидкістю реакції в гідравлічних приводах

Параметр	Традиційні гідравлічні приводи	Інтелектуальні гідравлічні приводи
Час реакції на гальмування (суха дорога)	0,5–0,8 с	0,1–0,3 с
Час реакції на гальмування (слизька дорога)	0,7–1,2 с	0,2–0,4 с
Відхилення тиску під час гальмування	±15%	±3%
Адаптація до змінного навантаження	Відсутня	Динамічний перерозподіл
Ефективність гальмування на різних покриттях	Низька на слизькій дорозі	Висока за рахунок сенсорного аналізу

Джерело: власна розробка авторів.

створювали надмірний тиск на окремі гальмівні механізми, що призводило до підвищеного зносу. Інтелектуальні приводи, навпаки, завдяки сенсорному моніторингу та алгоритмічному розподілу навантаження автоматично коригували тиск у кожному гальмівному контурі, забезпечуючи рівномірне навантаження і зменшуючи знос компонентів. Тож результати експерименту підтверджують доцільність використання інтелектуальних гідравлічних приводів для спеціалізованого транспорту, особливо в умовах високих навантажень, складного рельєфу і змінного коефіцієнта зчеплення з дорогою.

Додатково досліджено вплив адаптивного керування гідравлічними приводами на рівень зносу гальмівних компонентів, стабільність гальмування та енергоефективність. Для цього було використано ту саму симуляційну модель із параметрами, що враховують зміну навантаження, інтенсивність використання гальмівної системи та динаміку гальмівного процесу.

Додатковий етап експерименту включав випробування у двох режимах. У першому режимі моделювалися тривалі гальмівні цикли на різних типах дорожнього покриття (асфальт, мокра дорога, ґрунтове покриття), що дозволило оцінити рівень перегріву та нерівномірності зносу колодок і дисків. У другому режимі досліджувався вплив змінного навантаження на ефективність роботи приводів: гальмування моделювалося для транспорту, що рухався з непостійною масою (імітація розвантаження в русі або зміни розподілу навантаження між осями) (табл. 3).

Експеримент показав, що в традиційних гідравлічних системах гальмівне зусилля розподіляється нерівномірно, що призводить до прискореного зносу гальмівних колодок на ведучих осях.

Це пояснюється тим, що без адаптивного керування привод орієнтується на стандартні заводські налаштування та не враховує динаміку руху і навантаження, тоді як інтелектуальні приводи в режимі реального часу аналізують поточний стан транспортного засобу, що дозволяє більш ефективно розподіляти зусилля між колесами.

Перегрів гальмівних компонентів є ще одним важливим аспектом. Під час моделювання традиційні системи демонстрували локальні перегріви, особливо у випадках різкого гальмування або під час руху з навантаженням. Це може призводити до зниження коефіцієнта тертя та втрати ефективності гальмівної системи. В адаптивних системах через розумний перерозподіл зусиль та інтеграцію датчиків температури перегріву були значно зменшені, що позитивно впливає на довговічність гальмівних дисків і стабільність гальмування.

Щодо енергоефективності традиційні приводи функціонують у режимі постійного підтримання тиску в гідравлічній системі, що вимагає значних енергетичних витрат [8, с. 3352]. Інтелектуальні приводи, навпаки, оптимізують тиск відповідно до навантаження та швидкості руху, що дозволяє знизити споживання енергії без втрати ефективності.

Таким чином, результати підтверджують, що впровадження адаптивних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованого транспорту дозволяє значно покращити їх ефективність, подовжити термін служби компонентів, знизити витрати на обслуговування та підвищити загальну безпеку експлуатації.

Широке впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованого транспорту зіштовхується з низкою проблем, які охоплюють технічні, економічні та регуляторні

Таблиця 3

Вплив адаптивного керування гідравлічними приводами на знос гальмівних компонентів, стабільність гальмування та енергоефективність

Параметр	Традиційні гідравлічні приводи	Інтелектуальні гідравлічні приводи
Знос гальмівних компонентів	Нерівномірний, виражений на ведучих колесах	Рівномірний розподіл, зниження пікових навантажень
Температурний режим під час гальмування	Пікові перегріви, що спричиняють втрату ефективності	Контроль температури через рівномірний тиск
Стабільність гальмування в разі зміни навантаження	Втрата рівномірності через зміни навантаження	Автоматична адаптація забезпечує прогнозованість процесу
Частота необхідного обслуговування	Частіша заміна гальмівних колодок та дисків	Подовження ресурсу компонентів
Енергоефективність	Високі витрати на підтримання тиску	Оптимізація тиску та зниження енергоспоживання

Джерело: власна розробка авторів.

аспекти. Основною технічною перешкодою є складність інтеграції адаптивних систем у вже наявні транспортні платформи [11]. Більшість сучасних транспортних засобів мають традиційні гальмівні механізми, які не передбачають можливості модернізації під інтелектуальні гідравлічні приводи без суттєвої зміни конструкції, що потребує комплексного переоснащення [5]. Високий рівень автоматизації таких систем вимагає використання численних датчиків, електронних блоків керування та алгоритмів адаптивного регулювання, що створює ризики сумісності з іншими елементами керування транспортним засобом. Окрему складність становить забезпечення надійності та відмовостійкості інтелектуальних приводів у реальних умовах експлуатації [4]. Для спеціалізованого транспорту, який функціонує в умовах підвищеного навантаження, необхідні системи з високою механічною міцністю, стійкістю до екстремальних температурних режимів і вібраційних навантажень. Використання електронних модулів керування у складних умовах, в яких працює кар'єрна техніка або військовий транспорт, потребує додаткових заходів захисту від пилу, вологості та механічних пошкоджень, що значно ускладнює конструкцію [7, с. 199].

В економічному аспекті основним бар'єром є висока вартість упровадження інтелектуальних гідравлічних приводів [13]. Виробництво та обслуговування таких систем вимагає значних фінансових витрат, зокрема на розроблення адаптивних алгоритмів, установку сенсорних модулів і оновлення програмного забезпечення. Додатковим чинником є складність діагностики та ремонту, оскільки інтелектуальні приводи потребують спеціалізованого сервісного обслуговування, що збільшує витрати на їх експлуатацію.

Регуляторні обмеження також є вагомим фактором, що перешкоджає поширенню інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівних системах [9, с. 227]. Впровадження нових технологій вимагає відповідності міжнародним стандартам безпеки та сертифікації, що може займати тривалий час. У багатьох країнах чинне законодавство регламентує лише традиційні гідравлічні системи, а нормативна база щодо використання інтелектуальних гальмівних механізмів ще не сформована. Це створює невизначеність для виробників та операторів транспорту щодо можливості повноцінної інтеграції таких систем у сучасне виробництво.

Ефективне впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованого транспорту потребує комплексного підходу, який враховує сучасні технологічні тен-

денції та експлуатаційні вимоги. Основним напрямом модернізації є інтеграція адаптивних алгоритмів керування, що базуються на аналізі реальних умов руху та навантаження транспортного засобу. Для цього необхідно розробити ефективні сенсорні системи, здатні точно вимірювати параметри гальмування, включаючи тиск у приводах, швидкість реакції та рівень зчеплення з дорожнім покриттям. Використання датчиків навантаження та систем машинного навчання дозволить автоматично коригувати параметри роботи приводу, що підвищить стабільність гальмування та зменшить знос механічних компонентів.

Важливим аспектом впровадження є розроблення стандартизованих модулів керування, які можуть інтегруватися з наявними бортовими системами спеціалізованого транспорту. Оптимальним рішенням є створення універсальних електронних блоків керування, що підтримують гнучку конфігурацію та адаптацію до різних типів транспортних засобів. Це дозволить спростити процес модернізації без необхідності повної заміни гальмівних механізмів. Використання модульної архітектури приводу забезпечить можливість поступового оновлення окремих елементів системи без порушення загальної функціональності транспортного засобу.

Зменшення енергоспоживання є ключовим завданням у процесі впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів. Застосування енергоефективних насосів із регульованою продуктивністю дозволить мінімізувати витрати енергії, забезпечуючи при цьому високу швидкість реакції системи. Розподілені системи керування з функцією прогнозування навантаження дадуть змогу зменшити пікові навантаження на гідравлічні контури, що підвищить ресурс експлуатації компонентів і сприятиме зниженню витрат на обслуговування.

Для забезпечення надійності роботи інтелектуальних приводів у важких умовах експлуатації необхідно використовувати спеціалізовані матеріали з підвищеною зносостійкістю, стійкістю до високих температур і вібрацій. Гідравлічні рідини з покращеними характеристиками термостабільності дозволять запобігти втраті ефективності за тривалої експлуатації в екстремальних умовах. Використання резервних контурів живлення та дублюючих сенсорних систем забезпечить безперебійну роботу гальмівних приводів навіть у випадку відмови окремих елементів.

З урахуванням регуляторних обмежень важливим завданням є розроблення нормативних

стандартів, що визначають вимоги до сертифікації та випробувань інтелектуальних гальмівних систем. Для прискорення процесу впровадження необхідно розроблення галузевих рекомендацій, що містять адаптаційні механізми для поступової інтеграції адаптивних приводів у серійне виробництво. Важливою частиною цього процесу є тестування систем у реальних умовах експлуатації та створення бази даних щодо їх ефективності, що дозволить оцінити переваги технології перед широкомасштабним впровадженням.

Таким чином, ефективне застосування інтелектуальних гідравлічних приводів потребує інтеграції сучасних сенсорних систем, адаптивних алгоритмів керування, модульної архітектури та енергоефективних рішень. Створення нормативної бази та проведення широкомасштабних випробувань дозволить забезпечити економічно доцільну і безпечну інтеграцію технології в спеціалізований транспорт, що сприятиме підвищенню ефективності та безпеки його експлуатації.

Висновки. Дослідження підтвердило доцільність упровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованого транспорту як ефективного засобу підвищення стабільності, надійності та енергоефективності. Встановлено, що такі приводи забезпечують швидке реагування на зміну дорожніх умов, рівномірний розподіл гальмівного зусилля та зменшення зносу компонентів завдяки використанню адаптивного керування тиском. Отримані експериментальні результати свідчать про значне покращення характеристик гальмування в порівнянні з традиційними системами, зокрема в умовах змінного навантаження та низького коефіцієнта зчеплення з дорогою.

Серед основних проблем, що стримують широке впровадження інтелектуальних гідрав-

лічних приводів, виявлено технічні, економічні та регуляторні аспекти. До технічних перешкод належать складність інтеграції системи в наявні транспортні платформи, необхідність забезпечення високої надійності в умовах інтенсивної експлуатації та адаптація алгоритмів керування до різних категорій транспорту. Економічні чинники включають високу вартість запровадження, потребу в спеціалізованому сервісному обслуговуванні та тривалий термін окупності технології. З регуляторної точки зору основним викликом є відсутність уніфікованих стандартів для сертифікації та тестування таких систем, що ускладнює їх масове використання в серійному виробництві.

Рекомендовано розроблення та впровадження адаптивних алгоритмів керування, що базуються на аналізі реальних умов руху і навантаження, інтеграція високоточних сенсорних систем для контролю параметрів гальмування, а також застосування модульної архітектури приводів, що спростить процес модернізації сучасного транспорту. З метою підвищення надійності та зменшення витрат на обслуговування запропоновано використання зносостійких матеріалів, термостабільних гідравлічних рідин та резервних контурів живлення.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні ефективних методів сертифікації інтелектуальних гідравлічних приводів, дослідженні їх інтеграції в електрифіковані та автономні транспортні системи, а також у створенні адаптивних моделей оптимізації гальмівного процесу з використанням штучного інтелекту. Подальші експериментальні випробування в реальних умовах експлуатації дозволять розширити розуміння впливу таких приводів на безпеку та економічну ефективність роботи спеціалізованого транспорту.

Список літератури:

1. Hu C., Pan G., Kong L., Yu J. Research of Brake by Wire System. *Journal of Physics Conference Series*. 2023. Vol. 2479, № 1. Article 012051. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2479/1/012051>. (date of access: 14.08.2025).
2. Yang L., Yang Y., Wu G., Zhao X., Fang S., Liao X., Wang R., Zhang M. A systematic review of autonomous emergency braking system: impact factor, technology, and performance evaluation. *Journal of Advanced Transportation*. 2022. Vol. 2022, № 1. Article 1188089. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/1188089>. (date of access: 14.08.2025).
3. Watany M. Performance of a road vehicle with hydraulic brake systems using slip control strategy. *American Journal of Vehicle Design*. 2014. Vol. 2, № 1. P. 7–18. DOI: <https://pubs.sciepub.com/ajvd/2/1/2/#Cor>. (date of access: 14.08.2025).
4. Tavernini D., Vacca F., Metzler M., Savitski D., Ivanov V., Gruber P. An Explicit Nonlinear Model Predictive ABS Controller for Electro-Hydraulic Braking Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67, № 5. P. 3990–4001. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2916387>. (date of access: 14.08.2025).

5. Zhang K., Shang H., Xu J., Niu J., Yue Y. Testing and performance analysis of an integrated electromagnetic and hydraulic retarder for heavy-duty vehicles. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 126. Article 106906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106906>. (date of access: 14.08.2025).
6. Han W., Xiong L., Yu Z. Braking pressure control in electro-hydraulic brake system based on pressure estimation with nonlinearities and uncertainties. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 131. P. 703–727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.009>. (date of access: 14.08.2025).
7. Han W., Xiong L., Yu Z., Zhuo G., Leng B., Xu S. Integrated Pressure Estimation and Control for Electro-hydraulic Brake Systems of Electric Vehicles Considering Actuator Characteristics and Vehicle Longitudinal Dynamics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2023. Vol. 28, № 1. P. 197–209. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3119414>. (date of access: 14.08.2025).
8. Han W., Xiong L., Yu Z. A novel pressure control strategy of an electro-hydraulic brake system via fusion of control signals. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019. Vol. 233, № 13. P. 3342–3357. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407018821016>. (date of access: 14.08.2025).
9. Ji Y., Zhang J., He C., Hou X., Liu W., Han J. Wheel Braking Pressure Control Based on Central Booster Electrohydraulic Brake-by-Wire System. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2023. Vol. 9, № 1. P. 222–235. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3204187>. (date of access: 14.08.2025).
10. Tang Q., Yang Y., Luo C., Yang Z., Fu C. A novel electro-hydraulic compound braking system coordinated control strategy for a four-wheel-drive pure electric vehicle driven by dual motors. *Energy*. 2022. Vol. 241. Article 122750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122750>. (date of access: 14.08.2025).
11. Zhou Z., Yin X., Zhang J. Coordinated Control Strategy of Electro-Hydraulic Composite Braking Torque for the Distributed Electric Vehicles. *Machines*. 2022. Vol. 10, № 12. Article 1235. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10121235>. (date of access: 14.08.2025).
12. Nadeau J., Micheau P., Boisvert M. Collaborative control of a dual electro-hydraulic regenerative brake system for a rear-wheel-drive electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019. Vol. 233, № 4. P. 1035–1046. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407018754678>. (date of access: 14.08.2025).
13. Zhao X., Xiong L., Zhuo G., Tian W., Li J., Shu Q., Xu G. A Review of One-Box Electro-Hydraulic Braking System: Architecture, Control, and Application. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, № 3. Article 1049. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16031049>. (date of access: 14.08.2025).
14. Caterpillar 797F Mining Truck. Caterpillar: website. 2025. URL: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18093014.html (date of access: 14.08.2025).
15. Patria AMV XP – Number 1 in the battlefield. Patria: website. 2025. URL: <https://www.patriagroup.com/products-and-services/protected-mobility-and-defence-systems/vehicles/patria-amv-xp-number-1-in-the-battlefield> (date of access: 14.08.2025).
16. Volvo FH Series Trucks. Volvo Trucks: website. 2025. URL: <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/volvo-fh.html> (date of access: 14.08.2025).
17. Simulink: Simulation and Model-Based Design. MathWorks: website. 2025. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. (date of access: 14.08.2025).

Kholodnyi Y.F., Polishchuk D.V., Altuhov P.M., Zhovtobryukh V.O. PROSPECTS FOR THE USE OF INTELLIGENT HYDRAULIC ACTUATORS IN THE DESIGN OF BRAKE SYSTEMS FOR SPECIALISED VEHICLES

The study explores the prospects for implementing intelligent hydraulic actuators in the brake systems of specialized automotive vehicles, including mining dump trucks, military armored vehicles, and heavy-duty trucks, taking into account current technological trends and operational requirements. It has been established that traditional hydraulic actuators have limitations in terms of response time, uniform distribution of braking force, and energy efficiency, which reduces their effectiveness under variable operating conditions. The aim of the article is to investigate the potential of integrating intelligent hydraulic actuators into the brake systems of specialized automotive transport and to assess their effectiveness in enhancing safety, operational reliability, and energy efficiency.

The research methods include modeling braking dynamics in the MATLAB/Simulink environment, analyzing the performance characteristics of both traditional and intelligent systems, and experimentally evaluating component wear, braking stability, and energy consumption. A comparative analysis of actuator response speed, load distribution uniformity, and system adaptability to changing road and load conditions was conducted.

The results confirm that the use of intelligent hydraulic actuators significantly reduces brake pad wear, ensures stable braking even under complex road conditions, and increases energy efficiency through adaptive

pressure control. It was found that the main barriers to widespread implementation of this technology include integration complexity, high equipment and maintenance costs, and regulatory uncertainty.

Measures to address the identified issues include implementing modular brake system architectures, using sensor technologies for real-time braking process monitoring, and developing updated certification regulations for intelligent actuators. Future research will focus on improving wear prediction algorithms for braking components, enhancing adaptive pressure control methods, and developing integration strategies for intelligent actuators into next-generation automotive platforms.

Key words: *automotive brake system, adaptive braking, energy efficiency, automated control, sensor technologies, wear resistance, pressure optimization, integration of intelligent systems.*

Дата надходження статті: 15.09.2025

Дата прийняття статті: 01.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/45>

Барило Г.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

Голяка Р.Л.

Національний університет «Львівська політехніка»

Брич М.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Шлюсар Ю.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

Онутчак Т.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

РЕАЛІЗАЦІЯ СИГНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА УЛЬТРАЗВУКОВИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ПРОГРАМОВАНОЇ СИСТЕМИ НА КРИСТАЛІ

У статті розглянуто підхід до вбудованої самодіагностики сигнальних перетворювачів ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів. Запропоновано доповнення вхідного сигнального тракту сенсорного пристрою спеціалізованою схемою активації власних автоколивань п'єзоелектричного перетворювача. Метод ґрунтується на аналізі перехідних процесів та коливань на частоті власного резонансу при періодичному підключенні сенсора до трансїмпедансного підсилювача (TIA). У результаті TIA формує затухаючі автоколивання, а їх частота, амплітуда та швидкість затухання використовуються як діагностичні параметри для моніторингу стабільності та виявлення параметричного дрейфу.

Оптимізація режимів функціонування вузла на основі TIA виконана за критерієм максимальної ефективності формування інформативного сигналу. SPICE-моделювання підтвердило залежність характеристик вихідних імпульсів від елементів зворотного зв'язку (RFB, CFB) та параметрів операційного підсилювача, що дозволило сформулювати закономірності для контролю деградаційних процесів. Додатково показано, що введення інтегруючого конденсатора CFB знижує надлишкові високочастотні компоненти й стабілізує форму імпульсів, спрощуючи цифрову обробку.

Сигнальний тракт вбудованої системи реалізовано на базі PSoC 5LP, який об'єднує аналоговий фронт-енд (AMUX, OA, PGA, TIA) із цифровими модулями (ADC, SC, Timer, UART) у єдиній реконфігурованій мікросхемі. Розроблений застосунок iSound забезпечує керування процесами вимірювального перетворення, конфігурування параметрів і візуалізацію результатів у реальному часі.

Експериментальні дослідження підтвердили відтворюваність діагностичних сигналів і практичну реалізованість методу. Отримані результати демонструють перспективність застосування архітектури PSoC для створення компактних, енергоефективних та інтелектуальних сенсорних систем нового покоління. Такі системи можуть бути використані у промисловому моніторингу, медичній діагностиці та аерокосмічних застосуваннях, де критично важливими є надійність і стабільність роботи.

Ключові слова: п'єзоелектричний сенсор, самодіагностика, сигнальний перетворювач, вбудована система, PSoC, трансїмпедансний підсилювач.

Постановка проблеми. У сучасній сенсорній електроніці спостерігається інтенсивний розвиток пристроїв на основі п'єзоелектричних перетворювачів ультразвукового діапазону [1]. Базовим інформативним параметром більшості сенсорів є час прольоту (ToF, Time-of-Flight) ультразвукових коливань, що визначається шляхом вимірювання затримки Δt між випроміненим та прийнятим імпульсами [4]. Проте формування такого сигналу істотно залежить від сторонніх впливів, компенсація яких у багатьох випадках залишається проблематичною. Особливо складними є умови експлуатації у середовищах із жорсткими вимогами (harsh environments), зокрема в космічних застосуваннях [5, 6].

У зв'язку з цим постає завдання створення сигнального перетворювача ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів, який би поєднував точність вимірювального перетворення з вбудованою функцією самодіагностики. Таке рішення дозволить здійснювати моніторинг стабільності роботи сенсора та своєчасно виявляти параметричний дрейф, що підвищить надійність роботи сенсорних систем у критичних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогрес у розвитку сенсорних пристроїв зумовлений як появою новітніх структур, зокрема на базі MEMS-технологій та PMUT (Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers) [2, 3], так і розширенням сфер їх застосування, включно з електронікою Інтернету речей (IoT, Internet of Things) [4]. Розвиток сучасної сенсорики також тісно пов'язаний з інтелектуалізацією вимірювальних процесів на основі теорії надлишковості (redundancy theory) та її сучасного розвитку в інформатиці, сенсорикі й вимірювальній техніці [7, 8]. У таких підходах вимірювальна система формує додаткові інформативні сигнали – критерії стабільності функціонування сенсора, що ґрунтуються на аналізі релаксаційних процесів і перехідних характеристик у спеціалізованих сигнальних трактах.

Ключову роль у забезпеченні точності та стабільності відіграють мікроелектронні компоненти аналогового фронт-енду (AFE, Analog Front-End), які реалізують взаємодію між фізичним (аналоговим) та цифровим середовищем. З урахуванням тенденцій розвитку сенсорних технологій особливу актуальність мають вбудовані системи зі змішаним сигнальним (mixed-signal) перетворенням [9, 10]. Високу ефективність при їх проектуванні забезпечують програмовані системи на кристалі (PSoC, Programmable System-on-

Chip), які дозволяють інтегрувати вимірювальні, обчислювальні та діагностичні функції в єдиній мікросхемі [11]. Реалізація таких систем потребує функціонального аналізу та параметричної оптимізації сигнальних трактів, що досягається за допомогою модельних досліджень у середовищах SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [12, 13].

Таким чином, розроблення та реалізація сигнального перетворювача ультразвукових сенсорів із вбудованою самодіагностикою на основі PSoC є актуальним завданням, що поєднує надійність, функціональність та практичну придатність до використання в сучасних сенсорних системах.

Метою статті є розроблення та реалізація сигнального перетворювача ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів на основі програмованої системи на кристалі PSoC 5LP, який поєднує результати SPICE-моделювання та параметричної оптимізації із апаратною реалізацією аналогового фронт-енду та цифрових модулів і програмним забезпеченням iSound, що забезпечує підвищену стабільність, надійність та можливість вбудованої самодіагностики сенсорних систем.

Виклад основного матеріалу. Задача, що розглядається у статті, полягає в реалізації сигнального перетворювача ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів із вбудованою функцією самодіагностики. Основною метою є створення апаратно-програмного рішення, яке поєднує функції вимірювального перетворення та моніторингу стабільності роботи сенсора на єдиній платформі. Для цього у сигнальний тракт інтегровано спеціалізовану схему активації власних автоколивань п'єзоелектричного перетворювача. Суть методу полягає у моніторингу перехідних процесів та коливань на частоті власного резонансу при періодичному підключенні сенсора до трансімпедансного підсилювача (TIA, Transimpedance Amplifier). У такій конфігурації TIA формує затухаючі автоколивання, а за їх частотою, амплітудою та швидкістю затухання здійснюється контроль дрейфу параметрів п'єзоелектричного перетворювача.

Спрощена схема вбудованої діагностики зображена на рис. 1. Трансімпедансне перетворення реалізовано на операційному підсилювачі з резистором зворотного зв'язку RFB. Періодичне перемикання сенсора CQ між входом TIA та нульовим потенціалом забезпечує процес заряду-розряду, внаслідок чого на виході формується напруга VDG із характерними затухаючими коливаннями.

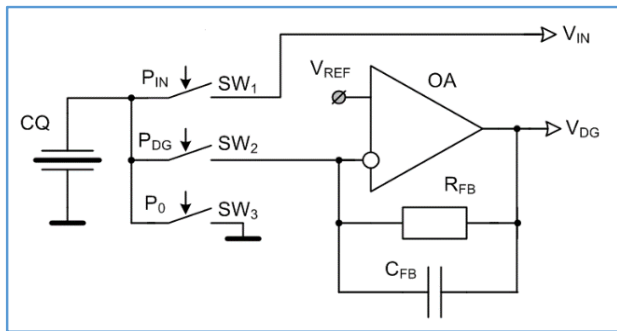


Рис. 1. Спрощена схема вбудованої діагностики приймального тракту п'єзоелектричних перетворювачів

У традиційному режимі сенсор формує інформативний сигнал V_{IN} , тоді як у режимі самодіагностики перемикається між інвертуючим входом ТІА та землею. Таким чином відбувається заряд до рівня V_{REF} і подальший розряд сенсора, що відтворює ефект релаксації.

Отримані результати моделювання підтвердили, що форма вихідного сигналу V_{DG} суттєво залежить від параметрів кола зворотного зв'язку та може бути використана для моніторингу нестабільності роботи сенсора.

Подальші дослідження були спрямовані на оптимізацію схеми за критерієм ефективності формування інформативного сигналу. Введення інтегруючого конденсатора C_{FB} у коло зворотного зв'язку дозволило регулювати динаміку перехідних процесів.

В результаті SPICE-моделювання отримано модифіковану схему (рис. 2) яка показує, що поєднання параметрів R_{FB} та C_{FB} дозволяє забезпечити як стійкість, так і достатню інформативність перехідних процесів.

Крім того, у подальших дослідженнях встановлено вплив параметрів сенсора (LS , CS) на форму сигналів V_{OUT} і V_{CQ} , зокрема:

- форма вихідних імпульсів керовано змінюється залежно від R_{FB} і C_{FB} ;
- великі значення R_{FB} спричиняють тривалу стабілізацію сигналів;
- введення C_{FB} зменшує надлишкові високочастотні компоненти та спрощує програмний аналіз;
- параметри сенсора визначають частоту та характер релаксації, що робить можливим відокремлення нестабільностей у сенсорі та сигнальному тракті.

Сигнальний тракт розробленої в рамках даної роботи вбудованої системи ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів з функцією самодіагностики реалізовано з використанням програмованої системи на кристалі PSoC (Programmable System on Chip) серії PSoC 5LP (Cypress, Infineon Technologies). В склад PSoC 5LP входять мікропроцесор, багатофункціональні модулі аналогового та цифрового перетворення сигналів, модулі пам'яті, інтерфейси та ряд інших важливих для концепції програмованої системи вузлів. З точки зору реалізації змішаного сигнального перетворення в сенсорній техніці перевагою вищезгаданого сімейства PSoC 5LP є широкий набір програмно керованих аналогових компонентів, режими роботи яких конфігуруються при їх ініціалізації та програмно керуються з допомогою API (Application Programming Interface).

Апаратну реалізацію сигнального перетворювача ультразвукових сенсорів на основі програ-

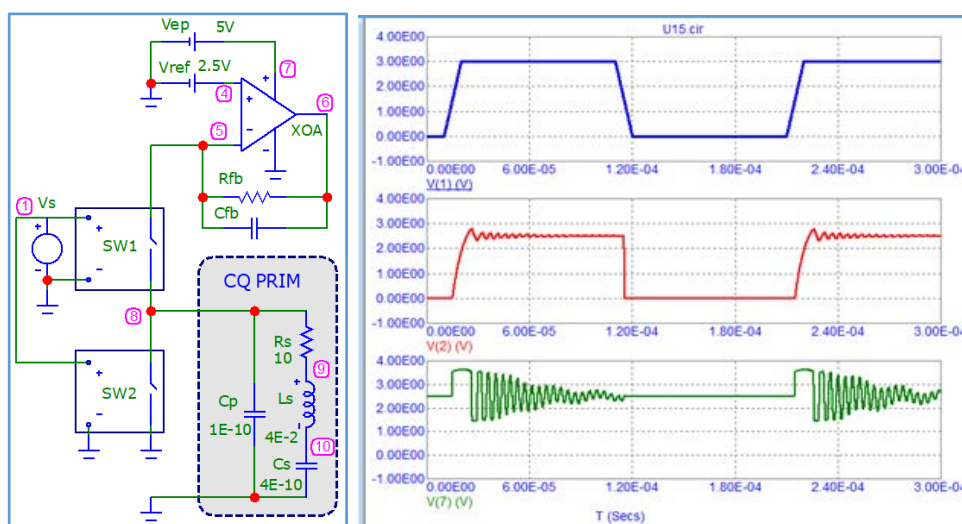


Рис. 2. SPICE-модель модифікованої схеми діагностики

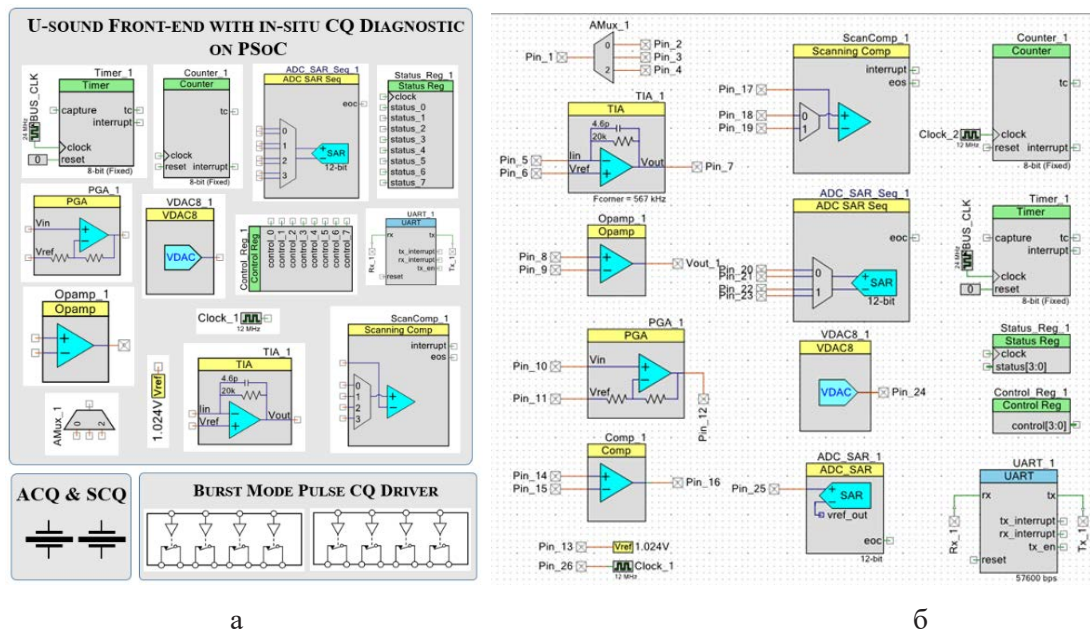


Рис. 3. Сигнальний перетворювач ультразвукового сенсора: а – структура; б – зображення схеми в режимі конфігурування зв'язків

мованої системи на кристалі з функцією самодіагностики UCQD (U-sound Front-end with in-situ CQ Diagnostic) виконано відповідно до структури представленої на рис. 3 а.

Функціональна організація цієї системи охоплює кілька взаємопов'язаних трактів.

Аналоговий тракт вхідного сигналу реалізований комбінацією мультиплектора аналогових сигналів (AMUX), операційного підсилювача (ОА) та підсилювача з програмно керованим коефіцієнтом підсилення (PGA). Така конфігурація забезпечує вибір вхідного каналу, його початкове підсилення та адаптацію параметрів до вимог подальшої обробки.

Тракт формування збуджувальних та цифрових сигналів містить цифро-аналоговий перетворювач (VDAC) для керування актюатором, а також аналого-цифровий перетворювач (ADC) типу SAR (Successive Approximation Register), який виконує перетворення аналогових сигналів у цифрову форму з високою швидкістю та точністю.

Часовий вимірювальний тракт призначений для визначення затримки Δt між випроміненим та прийнятим ультразвуковим імпульсом. Він реалізований за допомогою скануючого компаратора (SC), таймера (Timer) та лічильника (Counter), що спільно забезпечують реєстрацію та обробку сигналів для визначення параметра ToF (Time-of-Flight).

Тракт керування та передавання даних включає регістри програмного керування (Status_Reg, Control_Reg) та асинхронний інтерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

Ці елементи забезпечують конфігурування компонентів PSoC (рис. 3. б), їх синхронізацію та передавання вимірювальної інформації до зовнішніх систем. Зовнішній вигляд дослідного макета сигнального перетворювача показано на рис. 4.

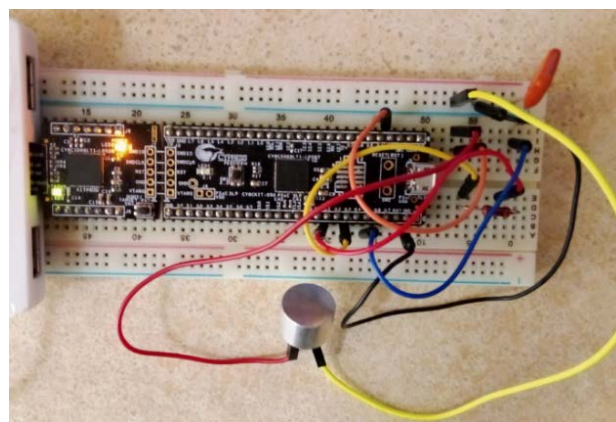
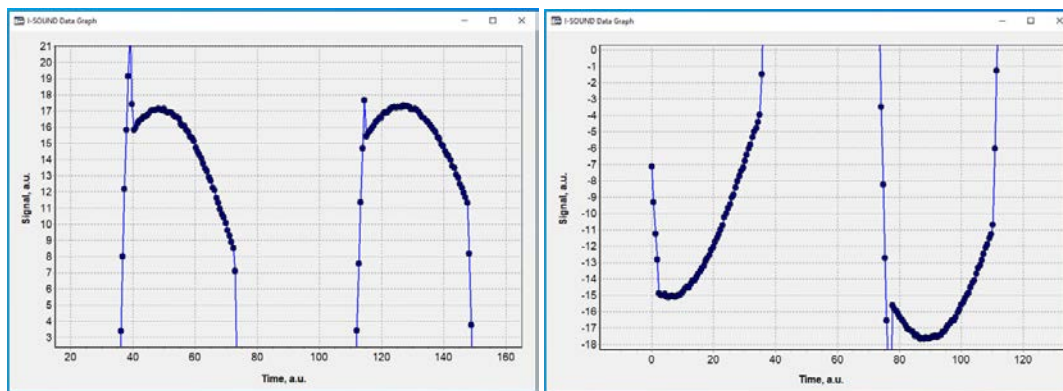


Рис. 4. Вигляд дослідного макета

Керування процесами вимірювального перетворення та візуалізація отриманих результатів здійснюється програмним застосунком iSound (рис. 5) у вікнах якого представляються широкі можливості програмного конфігурування компонентів PSoC (DSIN, SARN, DSC тощо) та формування режимів вимірювання (Mode:#, dt, NxС, ZS тощо). Для ілюстрації типових результатів вимірювання на рис. 5, а демонструється епюра періодичних процесів при періодичному перемиканні п'єзоелектричного перетворювача на вхід трансімпедансного підсилювача TIA у відповідності



а

б

Рис. 5. Зображення перехідних процесів при періодичному перемиканні п'єзоелектричного перетворювача: а – для високого рівня сигналу; б – для низького рівня сигналу

до запропонованого методу вбудованої діагностики вхідних трактів ультразвукових сенсорів.

Можна спостерігати наявність перехідних процесів, які виникають у моменти включення та відключення сенсора, що дає можливість отримати інформацію щодо властивостей матеріалу сенсора та формувати відповідні параметри, що властиво і вирішує задачу формування інформативних сигналів вбудованої діагностики.

Висновки. У роботі реалізовано сигнальний перетворювач ультразвукових сенсорів із вбудованою функцією самодіагностики на основі програмованої системи на кристалі PSoC 5LP (Cypress, Infineon Technologies). Архітектура пристрою

поєднує аналоговий фронт-енд (AMUX, ОА, PGA, ТІА) з цифровими модулями керування, що забезпечує інтеграцію та програмне конфігурування параметрів.

Практичне впровадження реалізовано з використанням застосунку iSound для керування вимірюваннями, конфігурації PSoC та візуалізації результатів. Експерименти підтвердили ефективність підходу та відтворюваність діагностичних сигналів.

Отримані результати доводять перспективність використання PSoC для створення компактних, енергоефективних та реконфігурованих сенсорних систем, придатних для роботи в умовах високих вимог до надійності.

Список літератури:

1. Zhou X., Lee H. J. Recent Advances in Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers (PMUTs) for Medical and Industrial Applications. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, No. 4. P. 1234. DOI: 10.3390/s21041234.
2. Muralt P., et al. Piezoelectric MEMS sensors and actuators: fundamentals and advances. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2020. Vol. 67, No. 6. P. 1208–1222. DOI: 10.1109/TUFFC.2020.2989874.
3. Ahmed S., Lee C. Ultrasonic Sensors for Internet of Things Applications: A Review. *Measurement*. 2022. Vol. 199. P. 111500. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111500.
4. Reverter F., Li X. Time-of-Flight Measurement Techniques for Ultrasonic Sensors: Challenges and Solutions. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, No. 10. P. 10823–10832. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3245678.
5. Kim J., et al. Reliability of Piezoelectric Sensors in Harsh Environments. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. Vol. 322. P. 112610. DOI: 10.1016/j.sna.2021.112610.
6. Teng X., et al. Piezoelectric Transducers for Space Applications: Materials and Reliability Issues. *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 170. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.01.009.
7. Ahrens M., et al. Redundancy in Sensor Networks: Principles and Applications in Self-Diagnosis. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 161233–161245. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3132134.
8. Chen Y., Zhang Y. Intelligent Sensor Systems with Built-in Self-Diagnostics Based on Redundancy Information Theory. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 17. P. 6488. DOI: 10.3390/s22176488.
9. Mandal S., et al. Embedded Systems for Ultrasonic Sensing: Design and Applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 12. P. 4012. DOI: 10.3390/s21124012.
10. Wang J., et al. Mixed-Signal Design for Embedded Ultrasonic Sensing Systems. *Microelectronics Journal*. 2022. Vol. 121. P. 105387. DOI: 10.1016/j.mejo.2022.105387.

11. Infineon Technologies. PSoC 5LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip. Cypress/Infineon, 2020. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PSoC_5LP (дата звернення: 24.09.2025).
12. Zhao L., et al. SPICE-Based Modeling of Ultrasonic Sensor Circuits for Reliability Analysis. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2023. Vol. 72. P. 3507910. DOI: 10.1109/TIM.2023.3507910.
13. Барило Г.І., Брич М.В., Шлюсар Ю.А., Живицький І.Б., Бойкачов Г.В., Пришляк С.О. Макромодель п'єзоелектричного перетворювача з розширеною функціональністю. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 36 (75) № 2, 2025. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/47>

Barylo H.I., Holyaka R.L., Brych M.V., Shliusar Yu.A., Onutchak T.A. DESIGN AND DEVELOPMENT OF A SIGNAL CONVERTER FOR ULTRASONIC SENSORS BASED ON A PROGRAMMABLE SYSTEM-ON-CHIP

This paper presents the design and development of a signal converter for ultrasonic piezoelectric sensors with an integrated self-diagnostic function, implemented on a programmable system-on-chip (PSoC 5LP, Cypress, Infineon Technologies). The motivation for this work stems from the growing importance of ultrasonic sensing in advanced electronic systems, where reliability and stability under varying operating conditions are crucial. Traditional approaches to signal conversion often face challenges associated with parameter drift of piezoelectric transducers and the influence of external factors, which significantly complicate accurate measurement and long-term operation.

The proposed approach addresses these limitations by introducing a novel method of embedded self-diagnostics. A specialized circuit was designed to activate intrinsic oscillations of the piezoelectric transducer, achieved through its periodic switching between the inverting input of a transimpedance amplifier (TIA) and ground potential. As a result, damped self-oscillations are generated, and their key characteristics – frequency, amplitude, and decay rate – serve as informative diagnostic parameters for evaluating the stability and identifying possible degradation of the sensor element.

Comprehensive SPICE simulations were conducted to analyze transient responses and the influence of feedback elements (RFB, CFB) as well as operational amplifier parameters (GBW, SRP, SRN) on the output waveform. These studies confirmed that predefined patterns of transient and oscillatory behavior can be used as diagnostic markers for detecting parameter variations. Furthermore, optimization of the TIA operating modes was performed according to the criterion of maximizing diagnostic signal efficiency, which significantly simplifies subsequent digital analysis.

The practical realization of the system was carried out on the PSoC 5LP platform, which combines analog front-end components with digital control and communication modules in a single reconfigurable chip. A dedicated software application, iSound, was developed to support sensor switching, parameter configuration, measurement control, and real-time visualization of results. Experimental validation demonstrated consistent and reproducible diagnostic signals under varying sensor conditions, confirming the robustness of the proposed approach.

The presented solution not only verifies the feasibility of TIA-based self-diagnostics for ultrasonic piezoelectric sensors but also highlights the broader potential of PSoC-based architectures. By integrating modeling, optimization, hardware implementation, and software support into a unified framework, this work contributes to the development of compact, energy-efficient, and intelligent ultrasonic sensing systems. Such systems are particularly relevant for applications requiring high reliability and adaptability, including industrial monitoring, medical diagnostics, and aerospace instrumentation.

Key words: piezoelectric sensor, self-diagnostics, signal converter, embedded system, PSoC, transimpedance amplifier.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 19.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025

РЕЦЕНЗІЇ

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/46>

Немченко М.В.

Експерт з розвитку та управління сільськогосподарським бізнесом

РЕЦЕНЗІЯ НА СТАТТЮ ВИКЛАДАЧІВ АГРАРНИХ ФАКУЛЬТЕТІВ БРАЗИЛІЇ V. ZIEGLER, R.T. PARAGINSKI ТА C.D. FERREIRA «GRAIN STORAGE SYSTEMS AND EFFECTS OF MOISTURE, TEMPERATURE AND TIME ON GRAIN QUALITY – A REVIEW»

У представленій до рецензування оглядовій статті авторський колектив – V. Ziegler, R. T. Paraginski та C. D. Ferreira – порушує надзвичайно важливу проблему, яка стосується забезпечення якісного, ефективного та безпечного зберігання зернових культур. У контексті сучасного стану глобального сільського господарства, що характеризується одночасним зростанням обсягів виробництва, зміною кліматичних умов, ускладненням логістичних ланцюгів і зростанням вимог до якості продукції, запропонована тематика має безперечну актуальність. Зокрема, в роботі зосереджено увагу на трьох основних фізичних факторах, які найбільше впливають на збереження якісних параметрів зерна впродовж усього періоду зберігання: рівень вологості, температурний режим і тривалість зберігання.

Автори демонструють глибоке розуміння фундаментальних процесів, які відбуваються із зерном після його збирання. Стаття містить чітко структурований опис усіх основних етапів: від досягнення фізіологічної стиглості зернової культури, через етапи сушіння, охолодження та закладки у сховище – до тривалого контролю середовища в зерносховищах. У тексті послідовно аналізується, яким чином коливання температури та вологості впливають на процеси дихання зерна, розвиток грибкової мікрофлори, зростання популяцій шкідників, а також загальну втрату маси та зниження споживчої якості. Особливої уваги заслуговує детальна інтерпретація хімічних змін, які відбуваються при підвищеній температурі – зокрема, процесів крохмалево-білкової деградації та гідролізу жирів, що безпосередньо впливають на смакові характеристики і безпечність продукту.

Оглядовий формат статті дозволив авторам максимально повно узагальнити дані з широкого кола джерел, охоплюючи період з 2008 до 2022 року. У тексті наведено більше тридцяти посилань на англomовні наукові джерела – серед них дослідження, опубліковані в журналах *Journal of Stored Products Research*, *Biosystems Engineering*, *Postharvest Biology and Technology* та інших авторитетних виданнях. Вибір джерел демонструє як широту географічного охоплення (дослідження із США, Індії, Китаю, Нігерії, Аргентини, Бразилії), так і тематичну глибину – від інженерного проектування силосів до біохімічного складу зерна за різних умов зберігання. У результаті створено комплексне бачення того, як вплив вологості, температури й часу корелює зі збереженням не лише фізичних, а й функціональних властивостей зерна.

До безумовних переваг рецензованої статті належить академічна точність формулювань, чітка термінологія та лаконічне, але інформативне представлення даних. Автори не лише описують наявні практики зберігання, а й прагнуть систематизувати їх залежно від типу конструкції сховища, об'єму зерна, кліматичного регіону, а також матеріальних можливостей агровиробників. У контексті цього варто відзначити чітке розмежування між активним і пасивним зберіганням, розгляд ефективності вентиляції, способів охолодження (включаючи використання охолоджувачів зерна), рівнів герметичності сховищ, а також впровадження сенсорного моніторингу за допомогою систем *Internet of Things* (IoT). Саме інтеграція новітніх цифрових рішень у практики зберігання – одна з ключових і перспективних ідей, на які звертається увага в роботі.

© Немченко М.В., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

У тексті приділено значну увагу особливостям зберігання різних видів зернових – кукурудзи, пшениці, сої, рису, сорго. Визначено порогові значення вологості для кожної культури, за яких втрата якості є мінімальною, а ризики мікробіологічного чи ентомологічного псування – контрольованими. Таким чином, стаття має не лише загальнонауковий, але й практичний характер, оскільки її положення можуть бути використані для створення нормативно-технічних регламентів або адаптовані в аграрному консалтингу.

Попри високу якість дослідження, варто вказати на кілька аспектів, які можна було б розширити у подальших роботах. По-перше, порушена тема порівняльної ефективності різних типів зерносховищ (металеві, бетонні, полімерні, дерев'яні) лише фрагментарно – бракує аналітичного зіставлення їх вартості, надійності, довговічності та екологічного сліду. По-друге, економічна доцільність впровадження тих чи інших технологій залишилася поза межами фокусу: не подано жодного розрахунку рентабельності чи оцінки окупності (payback period) модернізації складів. З огляду на те, що частка малих фермерських господарств залишається суттєвою, особливо в країнах Глобального Півдня, економічна складова набуває особливого значення.

Ще одним аспектом, який заслуговує на подальший розвиток, є вплив змін клімату на ефективність існуючих систем зберігання. Автори лише

побіжно згадують про температурні аномалії, тоді як підвищення середньорічної температури, збільшення вологості повітря та екстремальні погодні коливання вже зараз суттєво змінюють умови експлуатації сховищ і вимагають нових підходів до технічного проектування та регіоналізації технологій.

Незважаючи на вказані моменти, загальний рівень дослідження є високим. Текст написано чіткою академічною мовою, без лексичних або логічних помилок, із дотриманням стандартів наукового стилю. Стаття є результатом фахової, міждисциплінарної аналітичної роботи, яка поєднує технологічний, біологічний і управлінський компоненти проблеми зберігання зерна. Представлені матеріали можуть бути використані як у навчальному процесі на аграрних факультетах, так і в практичній діяльності фахівців із післязбиральної обробки продукції.

Стаття «Grain Storage Systems and Effects of Moisture, Temperature and Time on Grain Quality – A Review» є високоякісною публікацією, що має значну наукову й прикладну цінність. Авторський колектив продемонстрував глибоку обізнаність із темою, провів критичний аналіз наявних досліджень, узагальнив ключові підходи та окреслив подальші напрями розвитку технологій. Робота рекомендована до публікації у профільному міжнародному журналі з аграрної інженерії, післязбиральної технології або агрофуд-безпеки.

Список літератури:

1. Ziegler V., Paraginski R.T., Ferreira C.D. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality – A review. *Journal of Stored Products Research*. March 2021. 91:101770 <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101770>

Дата надходження статті: 24.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025

Відомості про авторів

Алтухов П.М. – викладач кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій Філії Класичного приватного університету у місті Кременчук, <https://orcid.org/0009-0002-9780-7611>

Антонюк О.І. – старший викладач кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури, факультет електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-9071-2292>

Баклан Д.В. – доктор філософії, асистент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-6608-0117>

Баранюк О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>

Барило Г.І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка», <https://orcid.org/0000-0001-5749-9242>

Бацак А.М. – інженер-технолог відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, <https://orcid.org/0009-0006-2077-0119>

Бегдай А.О. – науковий співробітник Навчально-наукової лабораторії молекулярної фармакології, хемогеноміки та біogerонтології Київського національного університету технологій та дизайну, <https://orcid.org/0009-0001-9868-066X>

Бернацький А.В. – кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>

Бессарабов В.І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри промислової фармації Київського національного університету технологій та дизайну; директор Інституту фізико-органічної хімії та вуглехімії імені Л.М. Литвиненка Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0003-0637-1729>

Бик М.В. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-0322-167X>

Богатирьова О.О. – завідувач діагностичної лабораторії ТОВ «ЦЕНТР СЛУЖБИ КРОВІ «БІО-ФАРМА ПЛАЗМА»

Бондарєва В.І. – заступник завідувача відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, <https://orcid.org/0009-0003-6177-6048>

Бордюг Д.Р. – здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти Національного транспортного університету

Борець С.О. – аспірант кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0009-0001-9899-1003>

Борисова Е.О. – магістр кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій, <https://orcid.org/0009-0005-0659-6401>

Босак А.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-0545-9980>

Бошкова І.І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0009-0009-5599-2709>

Брич М.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка», <https://orcid.org/0009-0003-8213-8897>

Бродович Ю.Р. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри інженерії, технологій та професійної освіти Мукачівського державного університету, <https://orcid.org/0009-0005-6458-3553>

Валюженич О.О. – аспірант Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0009-0000-3695-1658>

Ветошко І.П. – аспірант кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-0009-7610>

Вечурко О.М. – старший викладач кафедри навігації та управління суднами Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0009-0000-9005-3365>

Волгушева Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>

Воркут Т.А. – доктор технічних наук, завідувач кафедри транспортного права та логістики Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0003-0354-476X>

Воробйова В.І. – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

Гардер Д.А. – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0002-4066-8182>

Гмиря О.О. – магістр кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій, <https://orcid.org/0009-0000-0518-7722>

Гой А.М. – кандидат фармацевтичних наук, доцент, професор кафедри промислової фармації Київського національного університету технологій та дизайну; технічний директор Акціонерного товариства «Фармак», <https://orcid.org/0009-0004-7044-4050>

Голяка Р.Л. – доктор технічних наук, професор кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національний університет «Львівська політехніка», <https://orcid.org/0000-0002-7720-0372>

Гончаренко О.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту Полтавського державного аграрного університету, <https://orcid.org/0000-0002-4325-2705>

Гречановський А.П. – аспірант кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

Гринь А.П. – інженер-технолог відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, <https://orcid.org/0009-0003-1109-5578>

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського, <https://orcid.org/0000-0002-2019-2615>

Демиденко О.А. – аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0002-1544-4045>

Демченко О.В. – здобувач вищої освіти кафедри цивільного та промислового будівництва Черкаського державного технологічного університету, <https://orcid.org/0009-0002-7466-0311>

Дудка М.В. – аспірант кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0005-3565-6995>

Ентін І.І. – аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0009-0004-5545-7814>

Єрошенко О.Р. – старший викладач кафедри організації авіаційних перевезень Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-8411-1116>

Єфименко В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальної, органічної та фізичної хімії Національного університету біоресурсів та природокористування України, <https://orcid.org/0000-0002-4903-6173>

Жовтобрюх В.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій, Філії Класичного приватного університету у місті Кременчук, <https://orcid.org/0009-0007-2438-6082>

Іванченко А.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету, <http://orcid.org/0000-0002-1404-7278>

Іщенко К.С. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу геомеханічних основ технології відкритої розробки родовищ Інституту геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0003-2237-871X>

Іщенко О.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри промислової фармації Київського національного університету технологій та дизайну; провідний науковий співробітник Навчально-наукової лабораторії молекулярної фармакології, хемогеноміки та біogerонтології, <https://orcid.org/0000-0002-9510-6005>

Кириченко О.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0003-0545-4493>

Клименко В.В. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-4168-3296>

Клочков Ю.П. – кандидат економічних наук, доцент, завідувач кафедри навігації та управління суднами Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0009-0003-6044-1115>

Ключник І.І. – кандидат технічних наук, професор кафедри ПЕЕА Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0000-0002-9352-5716>

Коваленко А.Л. – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету, <http://orcid.org/0000-0003-1496-6634>

Коваль М.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0001-9680-8052>

Ковальова С.О. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри харчової хімії Національного університету харчових технологій, <https://orcid.org/0009-0008-8496-5200>

Козарь О.П. – доктор технічних наук, професор кафедри інженерії, технологій та професійної освіти Мукачівського державного університету, <https://orcid.org/0000-0001-6649-1699>

Коломієць Д.П. – старший викладач кафедри навігації та управління суднами Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0009-0002-7548-1999>

Комаров В.О. – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, <https://orcid.org/0000-0002-4929-4527>

Кондратенко Д.А. – магістрант кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0006-9296-9477>

Коновал В.М. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільного та промислового будівництва Черкаського державного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0002-6740-6617>

Коробко А.І. – доктор технічних наук, доцент Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, <https://orcid.org/0009-0007-2571-309X>

Корогодська А. М. – доктор технічних наук, старший дослідник, завідувач кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-1534-2180>

Кочкін І.А. – здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти Національного транспортного університету

Кравченко А.В. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету, <https://orcid.org/0009-0006-8833-3441>

Криволапов Г.Я. – магістр факультету інформаційних технологій та математики Київського столичного університету імені Бориса Грінченка, <https://orcid.org/0000-0002-0853-5881>

Криволапов Я.В. – асистент кафедри прикладних інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, <https://orcid.org/0000-0003-1151-9337>

Курило В.А. – завідувач групи відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0003-0790-9404>

Кустовська А.Д. – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри хімії і хімічної технології Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-6836-3305>

Кучук М.С. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету, <https://orcid.org/0009-0007-7969-316X>

Ларіна І.М. – PhD, старший викладач кафедри управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті Одеського національного морського університету, <https://orcid.org/0009-0005-1169-7223>

Лебедев Д.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-8672-8366>

Лисенко О.І. – аспірант кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-7276-9279>

Лінючева О.В. – доктор технічних наук, професор, декан хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-4181-5946>

Лукашенко В.А. – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, <http://orcid.org/0000-0002-9685-4654>

Лукашенко В.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем Черкаського державного технологічного університету, <https://orcid.org/0009-0006-7459-4704>

Лукін Є.О. – відділ експлуатації та постачання Херсонського морського торговельного порту, <https://orcid.org/0009-0002-5585-0515>

Мазорчук Т.В. – здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти Національного транспортного університету

Мазур О.М. – генеральний директор Приватне акціонерне товариство «Украгровибухпром»

Майборода О.І. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри харчової хімії Національного університету харчових технологій, <https://orcid.org/0009-0001-5737-8093>

Майзеліс А.О. – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-5296-9636>

Макаренко О.Г. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри харчової хімії, Національного університету харчових технологій, <https://orcid.org/0000-0002-9472-3546>

Макогон В.І. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0001-7176-2676>

Максютова О.В. – PhD, старший викладач кафедри інженерії, технологій та професійної освіти Мукачівського державного університету, <https://orcid.org/0000-0001-8400-1382>

Марінов А.І. – аспірант Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-8717-2734>

Матвєєва О.Л. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри хімії і хімічної технології Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-7450-0479>

Мельник В.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0009-0004-0940-8528>

Миронюк О.В. – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-0499-9491>

Михалевський Д.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету, <https://orcid.org/0000-0001-5797-164X>

Міхненко Я.О. – аспірант кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-8440-2514>

Москаль Р.М. – аспірант кафедри хімічної технології та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну, <https://orcid.org/0009-0006-1004-5917>

Мусієнко А.Д. – магістрант кафедри пошуку, рятування та спеціальної фізичної підготовки Української державної льотної академії, <https://orcid.org/0009-0003-3086-6032>

Набок Т.М. – молодший науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, <https://orcid.org/0009-0000-4863-2697>

Наритник Т.М. – кандидат технічних наук, професор, директор інституту спільного підприємства «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук національного прогресу»,

Наумчик А.О. – здобувач вищої освіти кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0006-3114-114X>

Невлюдов І.Ш. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Немченко М.В. – експерт з розвитку та управління сільськогосподарським бізнесом, <https://orcid.org/0009-0007-3277-4173>

Нестеренко М.М. – доктор технічних наук, доцент Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, <https://orcid.org/0000-0003-0812-2793>

Нікітін Д.О. – доктор філософії, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0000-0002-5591-4438>

Новальська Н.І. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-6331-9217>

Новіков Л.А. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу геомеханічних основ технології відкритої розробки родовищ Інституту геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0002-1855-5536>

Олександренко В.П. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, <https://orcid.org/0000-0002-2404-2104>

Омелян А.В. – доктор філософії, старший викладач кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-5481-6871>

Онучак Т.А. – аспірант кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка», <https://orcid.org/0009-0009-4739-1583>

Пазич В.Л. – здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0009-0000-2290-2070>

Пашенко Є.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу технології формування структурованих інструментальних композитів Інституту надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0001-5545-5780>

Петренко Т.В. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри харчової хімії Національного університету харчових технологій, <https://orcid.org/0000-0002-9696-882X>

Петунін А.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного права та логістики Національного транспортного університету, <http://orcid.org/0000-0002-8072-6842>

Поліщук Д.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій Філії Класичного приватного університету у місті Кременчук, <https://orcid.org/0000-0002-2426-6861>

Пономаренко І.О. – кандидат технічних наук, асистент кафедри цивільного та промислового будівництва Черкаського державного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0003-4296-3975>

Портянко Т.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності Черкаського державного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0003-3935-5178>

Прокудін О.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного права та логістики Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0003-2077-5746>

Радзівілов Г.Д. – кандидат технічних наук, професор, заступник начальника інституту з наукової роботи Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, <https://orcid.org/0000-0002-6047-1897>

Разумова К.М. – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри авіаційних перевезень Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-6385-2823>

Рачинський А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>

Решетков Д.М. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті Одеського національного морського університету, <https://orcid.org/0000-0001-7281-962X>

Роганін М.В. – аспірант кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту, Полтавського державного аграрного університету, <https://orcid.org/0009-0002-9230-9015>

Рой М.П. – доктор філософії, доцент, доцент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0001-5788-4220>

Романов О.І. – доктор технічних наук, професор Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-8683-3286>

Руденко В.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімії і хімічної технології Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-4052-6053>

Савченко Д.О. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0002-9474-3993>

Сайко В.Г. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, <https://orcid.org/0000-0002-3059-6787>

Самойленко П.О. – магістр кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій, <https://orcid.org/0009-0000-4118-9266>

Селіщев С.В. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту та логістики Приватного вищого навчального закладу «Європейський університет», <https://orcid.org/0000-0001-6242-6048>

Семенов І.В. – аспірант, керівник лабораторії, Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харківської філії Державної наукової організації «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування машин і технологій імені Л. Погорілого», <https://orcid.org/0009-0007-2571-309X>

Серденко Т.В. – кандидат фізико-математичних наук, старший викладач кафедри інженерії, технологій та професійної освіти Мукачівського державного університету, <https://orcid.org/0000-0002-1157-6115>

Сікорський О.О. – кандидат технічних наук, старший викладач Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-3730-2016>

Степанова Д.С. – здобувач вищої освіти кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0006-9664-7459>

Стеценко І.А. – здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти Національного транспортного університету

Столярченко Г.С. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0001-5287-3733>

Стратонов В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри пошуку, рятування та спеціальної фізичної підготовки Української державної льотної академії, <https://orcid.org/0000-0002-7366-4137>

Стрілець Р.Є. – доктор філософії, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, <https://orcid.org/0000-0001-5123-8703>

Тесленко О.І. – кандидат технічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу трансформації структури паливно-енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики Національної академії наук України, <https://orcid.org/0000-0002-3772-5991>

Тимофєєв Є.М. – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0006-0179-0472>

Тортіка Д.М. – аспірант кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету, <https://orcid.org/0009-0003-2777-8955>

Трофімов І.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії і хімічної технології Державного університету «Київський авіаційний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-5539-1166>

Федоренко В.В. – аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну; інженер-технолог Технологічної лабораторії Відділу технологічної розробки Акціонерного товариства «Фармак», <https://orcid.org/0009-0003-5113-6848>

Фисюк А.О. – ад'юнкт науково-організаційного відділу Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, <https://orcid.org/0009-0001-8998-9956>

Фоміна Н.М. – старший викладач кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету, <https://orcid.org/0000-0001-6745-0565>

Фролова Н.Е. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій, <https://orcid.org/0000-0001-9661-1540>

Хоботня Т.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0000-0001-7094-6297>

Холодний Ю.Ф. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій Філії Класичного приватного університету у місті Кременчук, <https://orcid.org/0009-0009-6695-8258>

Христич О.В. – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0003-2190-1492>

Цимбал О.В. – аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0002-0739-778X>

Шевченко В.І. – старший викладач кафедри навігації та управління суднами Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, <https://orcid.org/0009-0002-8927-5395>

Шлюсар Ю.А. – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка», <https://orcid.org/0009-0001-7849-4253>

Юсипів А.Р. – здобувач вищої освіти кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету, <https://orcid.org/0009-0001-6914-0111>

Юсипів Т.В. – доктор філософії, асистент кафедри інтегральних та диференціальних рівнянь Київського національного університету імені Тараса Шевченка, <https://orcid.org/0000-0003-2798-9472>

Яременко В.В. – аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну; начальник Технологічної лабораторії Відділу технологічної розробки Акціонерного товариства «Фармак», <https://orcid.org/0009-0001-1757-5500>

НОТАТКИ

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 5 2025

Частина 1

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *М. Михальченко*

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. 38,29. Ум. друк. арк. 39,99. Зам. № 1125/923

Підписано до друку 16.12.2025. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

Е-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.