

**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 37 (76) № 2 2026

Частина 2



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович, доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна

Члени редакційної колегії:

Бронін Сергій Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», Україна;

Гуйда Олександр Григорович, кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна;

Лисенко Олександр Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна;

Лісовець Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерних систем та технологій Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна;

Медведєв Микола Георгійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерних систем та технологій, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна;

Олещенко Любов Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна;

Скуратовський Руслан Вячеславович, кандидат технічних наук, доцент, докторант, Інститут математики НАН України, Україна;

Alexandr Neftissov, PhD, Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Kazakh National University of Sports, Kazakhstan;

Andreas Pester, Dr.phil.habil., Professor, Professor at the Faculty of Informatics and Computer Science, British University of Egypt, Egypt;

Danielienė Renata, Dr., Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Social Sciences and Applied Information, Vilnius University, Lithuania.

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 № 10 від 16 квітня 2026 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, 2026

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Перетятко Ю.В., Троценко Є.О., Нестерко А.Б., Паращинець А.Р.

ВПЛИВ ФАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ НА ФОРМУВАННЯ ЧАСОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН.....	1
--	---

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Воронець О.М., Пустовойтов П.С., Воронець В.М.

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСУ ЖИТТЯ ВУЗЛІВ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РОЛІ.....	12
---	----

Зимовченко В.О.

ОПТИМАЛЬНИЙ ВИБІР ДЛЯ СТАЦІОНАРНОГО ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІТІЄВИХ АКУМУЛЯТОРІВ.....	19
---	----

Калмиков О.С.

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ.....	25
--	----

Капличний О.С.

ДОСЛІДЖЕННЯ НВЧ КОМУТАТОРА З КОМПЕНСАЦІЄЮ ВІД'ЄМНОГО АКТИВНОГО ОПОРУ.....	34
---	----

Коновалов Д.Г., Яковенко І.В.

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАТРИМКО У РОЯХ ДРОНІВ.....	40
--	----

Михалевський Д.В., Васишин В.І., Коцюба В.П.

ОЦІНЮВАННЯ ПОКРИТТЯ КОРПОРАТИВНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ МОДИФІКОВАНОЇ МОДЕЛІ ОКАМУРА-ХАТА.....	47
--	----

Тарасенко Є.В.

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ СУПРОВОДУ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПЕРЕШКОД	53
---	----

ЕНЕРГЕТИКА

Безродний М.К., Вовк В.В.

ВПЛИВ БАЙПАСУВАННЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОТОЧНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ СУШАРОК ЗЕРНА.....	60
--	----

Боженко М.Ф.

МЕТОДИКА ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ В КОТЕЛЬНЯХ ПРИ ЗВОЛОЖЕННІ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ.....	70
---	----

Припула Н.О., Ляшенко А.М., Серeda В.В., Соломаха А.С.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСУШЕННЯ ПОВІТРЯ В РЕБРИСТО-ТРУБНОМУ ОХОЛОДЖУВАЧІ.....	77
--	----

Рачинський А.Ю., Баранюк О.В., Тихоход В.О., Пікенін О.О.

УДОСКОНАЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ КОТЛА ДКВР-10-13 ПРИ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ПАЛИВНОЇ БАЗИ.....	85
--	----

Ткачов А.К., Яганов П.О.

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ФУНКЦІЇ ЛАМБЕРТА У МОДЕЛЮВАННІ ТМП СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА СПРОЩЕНОГО АНАЛІТИЧНОГО ПІДХОДУ.....	93
--	----

Фатєєва К.О.

ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ В ПРОЦЕСАХ ЕКСТРАГУВАННЯ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИНІЗ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ.....	100
--	-----

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Воробйова В.І., Сікорський О.О.

СТВОРЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІРЖІ НА ОСНОВІ ПРИРОДНИХ ПОЛІФЕНОЛЬНИХ СПОЛУК.....	107
--	-----

Глуховський В.В. МІЖФАЗНА ВЗАЄМОДІЯ У ЗОНІ КОНТАКТУ ТА ЇЇ РОЛЬ У ЗМІЦНЕННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	115
Ілляшенко Ю.В., Єфименко В.В. ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИННИХ МОТОРНИХ ОЛИВ З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ ЇХ ЯКОСТІ.....	125
Косогін О.В., Кушмирук А.І., Ліночева О.В. ЕЛЕКТРОТИТРАЦІЙНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ СПОЛУК ГІДРАЗИНУ.....	131
Кусняк І.І., Бехта П.А., Козак Р.О., Копанський М.М., Ортинська Г.Є., Бринь О.І., Салабай Р.Г., Тимик Д.В., Кряжок С.А. ВПЛИВ ВИДУ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ МОДИФІКОВАНОГО КРОХМАЛЮ НА ВЛАСТИВОСТІ КАРТОНУ-ЛАЙНЕРА.....	139
Моргун В.І., Семешко О.Я., Салєба Л.В. РОЗРОБКА І ОЦІНКА ЯКОСТІ ТВЕРДОГО ШАМПУНЮ ПРОТИ ЛУПИ.....	146
Поліщук Б.В., Мітіна Н.Б. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВКЛАДИШАХ ПІЛЬГЕРНИХ СТАНІВ.....	152
Скиба М.І. СИНТЕЗ ТА ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЯ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛЮТАНТІВ	158
Солдатенков В.Ю., Мельник Л.І. БІОНАПОВНЮВАЧІ ЯК ІНСТРУМЕНТ ФОРМУВАННЯ ІЄРАРХІЧНОЇ ШОРСТКОСТІ У СУПЕРГІДРОФОБНИХ ПОКРИТТЯХ.....	165
Солод М.І. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ ПОВІТРЯ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВО-АНТРОПОГЕННИХ ВПЛИВІВ.....	176
Циганенко В.П., Трофімов І.І., Рогальський С.П. ВПЛИВ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХІМІЧНИХ ДОБАВОК НА ПРОТИЗНОШУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ І МОТОРНИХ ОЛИВ.....	182
Шкода В.О., Кравченко О.В., Гуляєв В.М., Коваленко А.Л. АВТОКЛАВНЕ ЛУЖНЕ ВИЛУГОВУВАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ РТ(PD)-КАТАЛІЗАТОРІВ НА АЛЮМІНІЙВМІСНОМУ НОСІЇ З МІНІМАЛЬНИМИ ВТРАТАМИ ПЛАТИНОЇДІВ.....	191

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Євтушенко А.В., Бойко Г.А., Зілінський А.І. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ НА ВІДОКРЕМЛЮВАНІСТЬ ЛУБ'ЯНОГО ВОЛОКНА ЗІ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО.....	196
Строкова Т.М., Сірко З.С., Ващенко В.В., Костенко О.І., Овчаренко А.О. МІКРОБІОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУБЛІМОВАНИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ НА ВИЯВЛЕННЯ ПАТОГЕННИХ МІКРООРГАНІЗМІВ.....	201

ТРАНСПОРТ

Бех Я.П. РЕЗЕРВУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ.....	208
Захарчук О.П. ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ЧИСЕЛ МЕХАНІЧНОЇ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ ПАСАЖИРСЬКОГО АВТОБУСА З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ.....	213
Коломицев В.М. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСМІСІЙ ПОВНОПРИВІДНИХ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ.....	221

Ловська А.О., Павлюченков М.В., Мурад'ян А.О., Демидюков О.В.	
ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ТРАПЕЦЕПОДІБНОГО ЗНІМНОГО ДАХУ НАПІВВАГОНА	227
Степанов О.В., Волобуєва Т.В.	
БЕЗПЕКА НА ТРАНСПОРТІ: КЛЮЧОВИЙ ФАКТОР РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ...	233
Турпак С.М., Фоміна А.М., Острогляд О.О., Олениця О.О., Лебідь Г.О.	
КОНВЕРГЕНЦІЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ ТА ОБОРОННОЇ СТІЙКОСТІ: НОВИЙ ФОРМАТ ЛОГІСТИКИ ПРОМИСЛОВОЇ ПРОДУКЦІЇ....	239
Хітров І.О.	
МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ ЯК ІНСТРУМЕНТ АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНІСТЮ.....	245
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	251

CONTENTS

ELECTRICAL ENGINEERING

Peretyatko Yu. V., Trotsenko Ye. O., Nesterko A. B., Parashchynets A. R.

INFLUENCE OF PHASE PARAMETERS OF HARMONIC COMPONENTS ON THE FORMATION OF TIME DEPENDENCES OF ELECTRICAL QUANTITIES.....1

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Voronets O.M., Pustovoitov P.Ye., Voronets V.M.

ANALYTICAL MODEL FOR PREDICTING THE LIFETIME OF SENSOR NETWORK NODES TAKING INTO ACCOUNT THEIR FUNCTIONAL ROLE.....12

Zymovchenko V.O.

OPTIMAL CHOICE FOR STATIONARY ENERGY STORAGE: A COMPARATIVE ANALYSIS OF LITHIUM BATTERIES.....19

Kalmykov O.S.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS TO IMPROVE THE RELIABILITY OF WIRELESS NETWORKS.....25

Kaplychnyi O.S.

RESEARCH OF A MICROWAVE SWITCH WITH NEGATIVE RESISTANCE COMPENSATION.....34

Konovalov D.H., Yakovenko I.V.

A PREDICTION-ORIENTED ROUTING MODEL FOR DELAY REDUCTION IN DRONE SWARMS. 40

Mykhalevskyi D.V., Vasylyshyn V.I., Kotsiuba V.P.

COVERAGE ASSESSMENT OF CORPORATE WIRELESS NETWORKS BASED ON A MODIFIED OKUMURA-HATA MODEL.....47

Tarasenko Ye.V.

METHODOLOGICAL BASIS OF INTELLECTUAL METHODS OF ACCOMPANYING AIR TARGETS IN CONDITIONS OF RADIO ELECTRONIC INTERFERENCE.....53

POWER ENGINEERING

Bezrodnyi M. K., Vovk V. V.

THE IMPACT OF HEAT PUMP BYPASSING ON THE ENERGY EFFICIENCY OF CONTINUOUS-FLOW HEAT PUMP GRAIN DRYERS.....60

Bozhenko M.F.

METHODOLOGY FOR SELECTING EQUIPMENT FOR FLUE GAS HEAT RECOVERY IN BOILER HOUSES WITH COMBUSTION AIR HUMIDIFICATION.....70

Prytula N.O., Lyashenko A.M., Sereda V.V., Solomakha A.S.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE AIR DEHUMIDIFICATION PROCESS IN A FINNED-TUBE HEAT EXCHANGER.....77

Rachynskyi A.Yu., Baranyuk O.V., Tykhokhod V.O., Pikenin O.O.

IMPROVEMENT OF RELIABILITY AND ENVIRONMENTAL SAFETY INDICATORS OF THE DKVR-10-13 BOILER DURING DIVERSIFICATION OF THE FUEL BASE.....85

Tkachov A.K., Yahanov P.O.

ANALYSIS OF THE USE OF THE LAMBERT FUNCTION IN MODELING THE MAXIMUM POWER POINT OF SOLAR CELLS AND A SIMPLIFIED ANALYTICAL APPROACH.....93

Fateeva K.O.

APPLICATION OF MICROWAVE HEATING IN THE EXTRACTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS FROM PLANT MATERIALS.....100

CHEMICAL TECHNOLOGY

Vorobiova V.I., Sikorsky O.O.

CREATION OF AN ECOLOGICAL RUST CONVERTER BASED ON NATURAL POLYPHENOL COMPOUNDS.....107

Glukhovskiy V.V.

INTERPHASE INTERACTION IN THE CONTACT ZONE AND ITS ROLE
IN STRENGTHENING OF COMPOSITE MATERIALS.....115

Ilyashenko Yu.V., Efymenko V.V.

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE USE OF VEGETABLE MOTOR OILS TAKING
INTO ACCOUNT CHANGES IN THEIR QUALITY.....125

Kosohin O.V., Kushmyruk A.I., Linyucheva O.V.

ELECTROTITRATION METHOD FOR DETERMINING THE CONTENT
OF HYDRAZINE COMPOUNDS.....131

**Kusniak I.I., Bekhta P.A., Kozak R.O., Kopanskyy M.M., Ortynska G.Ye., Bryn O.I.,
Salabay R.G., Tymyk D.V., Kriazhok S.A.**

INFLUENCE OF THE TYPE AND CONCENTRATION OF MODIFIED STARCH
ON THE PROPERTIES OF LINERBOARD.....139

Morgun V.I., Semeshko O.Ya., Saleba L.V.

FORMULATION AND QUALITY EVALUATION OF AN ANTIDANDRUFF SOLID SHAMPOO.....146

Polishchuk B.V., Mitina N.B.

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF POLYMER PLAIN BEARINGS
IN PILGER ROLLING MILLS.....152

Skyba M.I.

SYNTHESIS AND FUNCTIONALIZATION OF GOLD NANOPARTICLES
FOR POLLUTANT DETECTION.....158

Soldatenkov V.Yu., Melnyk L.I.

BIOFILLERS AS A TOOL FOR FORMING HIERARCHICAL ROUGHNESS
IN SUPERHYDROPHOBIC COATINGS.....165

Solod M.I.

THE RESEARCH ON AIR POLLUTION DUE TO MILITARY-ANTHROPOGENIC INFLUENCES.....176

Tsyhanenko V.P., Trofimov I.L., Rogalskyi S.P.

IMPACT OF FUNCTIONAL CHEMICAL ADDITIVES ON THE ANTIWEAR PROPERTIES
OF DIESEL FUELS AND MOTOR OILS.....182

Shkoda V.O., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L.

AUTOCLAVE LEACHING OF SPENT PT(PD)-CATALYSTS ON ALUMINIUM-BASED
SUPPORTS WITH MINIMAL PLATINUM LOSSES.....191

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Yevtushenko A.V., Boiko H.A., Zilinskyi A.I.

INFLUENCE OF ULTRASOUND CAVITATION TREATMENT PARAMETERS
ON THE SEPARATION OF FLAX FIBER FROM OIL FLAX STEM.....196

Strokova T.M., Sirko Z.S., Vashchenko V.V., Kostenko O.I., Ovcharenko A.O.

MICROBIOLOGICAL STUDIES OF FREEZED FOOD PRODUCTS FOR THE DETECTION
OF PATHOGENIC MICROORGANISMS.....201

TRANSPORT

Bekh Ya.P.

RESERVATION OF RAILWAY AUTOMATION DEVICES AND TELECOMMUNICATION
SYSTEMS FOR IMPLEMENTATION OF SOLAR ENERGY.....208

Zakharchuk O.P.

OPTIMIZATION OF GEAR RATIOS OF A PASSENGER BUS MANUAL TRANSMISSION
TO IMPROVE FUEL ECONOMY.....213

Kolomytsev V.M.

ANALYSIS OF MODERN TRANSMISSION DESIGNS ALL-WHEEL DRIVE TRUCKS.....221

Lovska A.O., Pavliuchenkov M.V., Muradian A.O., Demydiakov O.V.

FEATURES OF DETERMINING THE VERTICAL LOADING OF A TRAPEZOID-SHAPED
REMOVABLE ROOF OF AN OPEN WAGON.....227

Stepanov O.V., Volobuyeva T.V. TRANSPORT SAFETY: A KEY FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT SYSTEM.....	233
Turpak S.M., Fomina A.M., Ostrohliad O.O., Olenytsia O.O., Lebid H.O. CONVERGENCE OF OPERATIONAL PLANNING, INTELLIGENT TRANSPORTATION AND DEFENSE RESILIENCE: A NEW FORMAT FOR INDUSTRIAL PRODUCT LOGISTICS.....	239
Khitrov I.O. TRANSPORT SYSTEM MODELING AS A TOOL FOR MOBILITY ANALYSIS AND MANAGEMENT.....	245
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	251

УДК 621.315.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/01>**Перетятко Ю.В.**<https://orcid.org/0000-0003-1397-8078>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Троценко Є.О.<https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нестерко А.Б.<https://orcid.org/0000-0001-7488-4214>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Паращинець А.Р.<https://orcid.org/0009-0009-3583-2839>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ФАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ НА ФОРМУВАННЯ ЧАСОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

У роботі досліджено вплив амплітудних і фазових параметрів вищих гармонічних складових струму на геометрію часової кривої в низьковольтних електричних мережах. Актуальність дослідження зумовлена зростанням частки нелінійних навантажень із силовою електронікою, що призводить до формування несинусоїдних режимів та погіршення показників якості електричної енергії. Проаналізовано чинну нормативну базу у сфері оцінювання якості електроенергії, зокрема положення стандартів ДСТУ EN 50160, IEEE 519, IEEE 1459 та IEC 60050-161, і встановлено, що сучасна система нормування ґрунтується переважно на інтегральних та спектральних показниках, які враховують лише амплітудні характеристики гармонічних складових. У межах дослідження виконано чисельне моделювання поетапного спотворення синусоїдальної форми струму гармоніками 3-го, 5-го, 7-го та 9-го порядків за різних значень індивідуального гармонічного спотворення та початкових фаз. Показано, що за фіксованого амплітудного спектра вирішальний вплив на форму часової кривої має фазове співвідношення між гармонічними складовими. Встановлено, що фазове співпадіння максимумів фундаментальної та вищих гармонік зумовлює переважно амплітудну деформацію сигналу, тоді як протифазне накладання призводить до формування просідань, трапецеїдальних і М-подібних форм та появи локальних коливань. Доведено, що за однакових значень коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) геометрія часової кривої струму може істотно відрізнятися залежно від фазових характеристик гармонік. Показано можливість взаємної компенсації вищих гармонічних складових при паралельному підключенні нелінійних навантажень із різними фазовими параметрами, що не відображається традиційними інтегральними показниками якості електроенергії. Отримані результати підтверджують обмежену інформативність існуючих нормованих показників щодо опису реальної форми сигналу та обґрунтовують доцільність урахування фазових характеристик гармонічних складових при аналізі несинусоїдних режимів.

Ключові слова: якість електричної енергії; нелінійні навантаження; гармонічні спотворення струму; фазові співвідношення гармонік; геометрія часової залежності; коефіцієнт гармонічних спотворень; індивідуальні гармонічні складові.

Постановка проблеми. У сучасних низьковольтних електричних мережах спостерігається стійка тенденція до зростання частки навантажень із нелінійними вольт-амперними характеристиками. Це зумовлено широким впровадженням силової електроніки, імпульсних джерел живлення, перетворювальної техніки та керування електроприводів у побутовому, комерційному та промисловому секторах. До таких навантажень належать, зокрема, джерела безперебійного живлення, світлодіодні системи освітлення, інверторні кондиціонери, холодильники та інша електронна побутова техніка.

Нелінійний характер споживання електричної енергії цими пристроями може призводити до істотного спотворення форми струму навіть за умови живлення від напруги, близької до синусоїдальної. Унаслідок цього в електричних мережах формуються несинусоїдні режими, що супроводжуються появою вищих гармонічних складових у струмах і напругах. Гармонічні спотворення є одним із чинників, які пов'язують із додатковими втратами електричної енергії, локальними перегрівками електрообладнання, зниженням ресурсу ізоляції та порушенням коректної роботи електропристроїв [1, 2].

Зростання щільності нелінійних навантажень зумовлює необхідність систематичного моніторингу показників якості електричної енергії (Power Quality, PQ), а також підвищує вимоги до забезпечення електромагнітної сумісності елементів електроенергетичних систем.

Якість електричної енергії унормовується для окремої країни або групи країн відповідними стандартами. У межах даної роботи розглянуто національні (ДСТУ), європейські (EN), міжнародні (IEC) та американські (IEEE) нормативні документи. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення встановлені для групи європейських країн стандартом, чинним в Україні як національний – ДСТУ EN 50160:2023 [3]. Вимоги до якості електричної енергії в США визначені стандартом IEEE Std 519-2022 [4]. Терміни та визначення щодо якості електроенергії наведені в міжнародному стандарті, чинному в Україні, – ДСТУ IEC 60050-161 [5], а також у стандарті США – IEEE Std 1459-2025 [6].

Динаміка змін нормативних документів у сфері якості електроенергії свідчить про їх активне оновлення: протягом останніх п'яти років усі зазначені стандарти були переглянуті та перезатверджені. Водночас було скасовано два наці-

ональні стандарти – ДСТУ 3466-96 [7] і ДСТУ 2815-94 [8], які регламентували терміни та визначення в цій галузі, а також американський стандарт IEEE Std 446-1995 (ANSI/IEEE 446) [9], що стосувався питань аварійного та резервного електропостачання.

Чинна нормативна та науково-технічна практика оцінювання якості електричної енергії в умовах несинусоїдних режимів базується переважно на використанні інтегральних показників і спектральному аналізі амплітуд гармонічних складових, що фактично відповідає аналізу амплітудно-частотного спектра електричних величин. При цьому, згідно з європейським стандартом [3], оцінювання обмежується показниками, що характеризують напругу в мережі, тоді як вимоги стандарту [4] поширюються як на напругу, так і на струми.

Інформативність унормованих показників якості зумовлена тим, що у розрахункових виразах для їх визначення використовуються переважно амплітудні параметри гармонічних складових. Фазово-частотний розподіл гармонічного спектру напруги та струму залишається поза увагою нормативного оцінювання, хоча саме він визначає геометрію часових кривих електричних величин.

За однакових амплітудно-частотних розподілів, але різних фазо-частотних, часові криві напруги та струму можуть істотно відрізнятися за формою. Це проявляється у зміні значень і положення точок екстремумів, кількості та характеру точок заломлення в межах кожної чверті періоду, а також у швидкості зміни миттєвих значень сигналу між цими точками. Зазначені геометричні особливості мають визначальне значення, зокрема під час оцінювання процесів електричного старіння твердої ізоляції електротехнічного обладнання та інтенсивності часткових розрядів, які є чутливими до локальних пікових значень напруженості електричного поля.

З огляду на викладене, актуальним є поглиблений аналіз показників якості електричної енергії з позицій їх інформативності щодо геометрії кривих. Окремий інтерес становить вивчення закономірностей спотворення синусоїдальної форми сигналу окремими гармоніками та їх комбінаціями за різних амплітудних та фазо-частотних співвідношень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні науково-прикладні дослідження, присвячені впливу індивідуальних побутових електропристроїв із силовою електронікою, свідчать про наявність тенденції до спотворення синусоїдальної форми струму мережі. У гармонічному

спектрі таких струмів, як правило, домінують непарні вищі гармонічні складові низьких порядків, зокрема 3-я, 5-а, 7-а та 9-а гармоніки [10-13]. Зазначене є характерною ознакою нелінійних навантажень із випрямлячами та імпульсними перетворювачами, що широко застосовуються в сучасній побутовій та офісній техніці.

Традиційно в більшості досліджень оцінювання рівня спотворення струму здійснюється на основі інтегральних показників, зокрема загального коефіцієнта гармонічних спотворень (THD), коефіцієнта індивідуального гармонічного спотворення (IGD), діючого значення (RMS), коефіцієнта спотворення (DF) та сумарного гармонічного спотворення струму відносно номінального навантаження (TDD). Для ряду європейських країн нормативна база у сфері якості електричної енергії та електромагнітної сумісності формувалася протягом другої половини XX – початку XXI століття та передбачає розмежування вимог до характеристик напруги електропостачання і вимог до споживачів електричної енергії. Зокрема, стандарт [3] встановлює межі для загального коефіцієнта гармонічних спотворень, показників індивідуального гармонічного спотворення та допустимі межі відхилень виключно для напруги електропостачання в точках загального приєднання електричних мереж за нормальних умов експлуатації, без унормування відносного спектрального складу струмів навантажень, тоді як нормативні документи з електромагнітної сумісності більше спрямовані на обмеження емісії гармонічних складових струму окремими електроприймачами у абсолютних значеннях з метою запобігання недопустимому впливу на електричну мережу та суміжне обладнання.

Аналіз низки сучасних публікацій, зокрема [10-13], показує, що останні дослідження якості електроенергії зосереджуються на гармонічних спотвореннях струмів. Ці спотворення часто стають більш вираженими порівняно зі спотвореннями напруги у низьковольтних розподільчих мережах через зростання частки нелінійних споживачів.

Характерною особливістю розглянутих робіт є застосування інтегральних показників якості, зокрема коефіцієнта гармонічних спотворень (THD), а також аналіз амплітудно-частотних спектрів струмів для оцінки впливу нелінійних навантажень.

У роботах «Вплив гармонік струму нелінійних навантажень на якість електроенергії низьковольтної мережі – огляд та тематичне дослідження» [10] і «Вплив гармонік струму нелінійних наван-

тажень на якість електроенергії та втрати в системах розподілу електроенергії» [11] якість електричної енергії оцінюється за показником THD у поєднанні зі спектральним аналізом струмів; при цьому в роботі [11] додатково використано еквівалентну модель Нортон для опису взаємодії нелінійних навантажень із мережею.

Дослідження «Перешкоди, що створюються системами освітлення зі світлодіодними лампами, та зменшення їхнього впливу» [12] зосереджене на впливі світлодіодних джерел світла. Окрім THD, в ньому застосовують коефіцієнт амплітуди струму (CF) та коефіцієнт потужності (PF), а також пропонують метод зменшення гармонічних спотворень шляхом удосконалення структури джерела живлення.

Роботу «Гармонійні спотворення, спричинені нелінійними побутовими навантаженнями: вимірювання та моделювання» [13] присвячено моделюванню сукупності побутових нелінійних навантажень у житловому будинку з використанням комплексного гармонічного аналізу для оцінювання їхнього сумарного впливу на параметри мережі.

Результати останніх науково-практичних досліджень вказують на можливий негативний вплив нелінійних навантажень на якість електроенергії, що може проявлятися у зростанні втрат, спотворенні форм електричних величин через високу частку вищих гармонічних складових у кривих струму та експлуатаційних проблемах обладнання. Водночас більшість досліджень обмежується використанням інтегральних показників та амплітудно-частотних спектрів, тоді як вплив фазових співвідношень між гармонічними складовими, які визначають геометрію часових кривих, залишається недостатньо вивченим.

Постановка завдання. Метою роботи є комбінована оцінка впливу амплітудних та фазових параметрів вищих гармонічних складових струму на форму часової кривої в низьковольтній електричній мережі, а також перевірка гіпотези про обмеженість традиційних спектральних і інтегральних показників якості електроенергії у відображенні такого впливу.

Виклад основного матеріалу. Для комплексної оцінки якості електричної енергії у наукових дослідженнях та інженерній практиці застосовується широкий спектр показників, що характеризують ступінь спотворення синусоїдальних сигналів напруги та струму внаслідок гармонічних складових. При цьому ці показники регламентуються різними стандартами, іноді використовують різну термінологію

та визначення навіть для однакових фізичних явищ, а деякі нормативно затверджені коефіцієнти залишаються маловживаними у практиці.

Відсутність єдиного підходу до формалізації та використання інтегральних і індивідуальних показників якості електроенергії робить доцільним їх детальний порівняльний аналіз. Це допомагає виявити основні нормативні розбіжності, оцінити застосовність показників у сучасній інженерній практиці та визначити можливі напрямки подальших досліджень і стандартизації.

Періодичний електричний сигнал, що містить гармонічні складові, аналітично описується дискретним рядом [14]:

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} f_{(h)}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} F_{(h)} \sqrt{2} \cdot \sin(h\omega t + \psi_{(h)}),$$

де $f(t)$ – миттєве значення несинусоїдальних напруги або струму як функції часу; $f_{(h)}(t)$ – миттєве значення гармонічної складової напруги або струму як еквівалентної синусоїди; $F_{(h)}$ – діюче значення гармонічної складової; ω – кутова частота основної гармоніки; $\psi_{(h)}$ – початкова фаза гармонічної складової; h – порядковий номер гармонічної складової.

У нормативній та науково-технічній практиці вплив кожної окремої гармонічної складової напруги або струму оцінюється відношенням діючого значення вищої гармоніки до діючого значення основної гармоніки як

$$\frac{F_{(h)}}{F_{(1)}},$$

де $F_{(1)}, F_{(h)}$ – діючі значення основної (першої) та вищої гармонічної складової h порядку напруги або струму відповідно.

За фізичним змістом таке відношення характеризує відносний вклад окремої гармонічної складової у спотворення синусоїдної форми кривої та згідно ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 [5] вводиться як термін *h-th Harmonic Ratio*. У наукових текстах, зокрема в [11], даний показник використовується з назвою *Individual Harmonic Distortion*.

Контроль гармонічних спотворень здійснюється за стандартами IEEE 519-2022 [4] у США та EN 50160:2023 [3] у групі європейських країн. Обидва документи встановлюють граничні значення індивідуальних гармонічних складових напруги $\left(\frac{U_{(h)}}{U_{(0)}}\right)$, при цьому стандарт IEEE 519-2022 поширюється також на струми. У стандартах серії ІЕС/EN 61000-3-2 [15], що регламентують електромагнітну сумісність обладнання, допустимі рівні гармонік струму встановлюються в абсолютних значеннях (амперах), а не у відносних величинах приведених до основної гармоніки. При цьому жоден з наведених докумен-

тів не використовує термін *h-th Harmonic Ratio* або *Individual Harmonic Distortion (IHD)*.

Одним із базових інтегральних показників оцінювання несинусоїдності напруги та струму є показник, який в міжнародній практиці використовується під англійською назвою *Total Harmonic Distortion (THD)*, зокрема у ДСТУ EN 50160:2023 [3], IEEE Std 1459-2025 [6] та ІЕС 60050-161:2003 [5]. Згідно з наведеними стандартами, коефіцієнт THD визначається як відношення діючого значення сукупності вищих гармонічних складових напруги (струму) до діючого значення основної (першої) гармоніки і може бути записаний у вигляді

$$THD_f = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} F_{(h)}^2}}{F_{(1)}} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \eta_{(h)}^2},$$

де $F_{(h)}$ – діюче значення h -ї гармонічної складової напруги або струму;

$F_{(1)}$ – діюче значення основної гармоніки напруги або струму;

$\eta_{(h)} = \frac{F_{(h)}}{F_{(1)}}$ – пропонуване умовне позначення індивідуального гармонічного спотворення в рамках даної роботи.

Метрологічна оцінка електричних величин за будь-яких режимів роботи здійснюється через ефективне значення напруги та струму. Поняття ефективного значення змінної електричної величини за математичним змістом відповідає середньоквадратичному (англ. Root Mean Square, RMS) і застосовується як до синусоїдних, так і до несинусоїдних періодичних сигналів. Нормативне математичне визначення середньоквадратичного значення несинусоїдної напруги або струму закріплене в ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 [5]. Для інженерного аналізу несинусоїдних режимів RMS використовує амплітудний спектр сигналу. У ряді наукових робіт даний показник вводиться як залежність від коефіцієнта THD [14].

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T f_{(h)}^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} F_{(h)}^2} = F_{(1)} \sqrt{1 + THD_f^2},$$

де F_{RMS} – ефективне (середньоквадратичне) значення періодичного змінного сигналу напруги або струму.

Частка основної гармонічної складової у повному (несинусоїдному) сигналі у нормативних документах вводиться під різними назвами, проте має ідентичний фізичний зміст і математичне визначення. У ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 [5] аналогічний показник наведено під назвою *Fundamental Factor*, тоді як у IEEE Std 1459-2025 [6] для цього ж коефіцієнта використовується тер-

мін Distortion Factor (DF). Незважаючи на різну термінологію, у зазначених стандартах коефіцієнт визначається як відношення діючого значення основної гармоніки до діючого значення періодичного сигналу напруги або струму, тобто

$$DF_f = \frac{F_{(1)}}{F_{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_f^2}}.$$

За фізичним змістом коефіцієнт даний коефіцієнт в інженерній практиці більш відомий як DF та безпосередньо пов'язаний з енергетичним балансом сигналу та використовується в аналізі потужностей за несинусоїдних режимів.

Серед термінологічної бази математичного аналізу та теоретичних основ електротехніки наявна низка неунормованих понять призначених для кількісного опису форми та несинусоїдності напруги й струму, а саме: коефіцієнт гармонік, коефіцієнт форми кривої та коефіцієнт амплітуди кривої. Частина цих коефіцієнтів раніше визначалася нормативними документами, дію яких наразі припинено.

Серед перелічених коефіцієнтів на практиці застосовують коефіцієнт амплітуди (англ. Crest Factor, CF), який визначається як відношення пікового значення напруги або струму до їх діючого (RMS) значення:

$$CF = \frac{|F_{max}|}{F_{RMS}}$$

де F_{max} – максимальне за модулем миттєве значення напруги або струму за період.

Аналіз міжнародних нормативних документів з якості електричної енергії (IEC, EN, IEEE) показує, що CF не належить до основних нормованих показників якості електроенергії, однак використовується як допоміжний індикатор форми сигналу та здатності системи електроживлення відтворювати пікові навантаження.

Гармонічні спотворення струму є найбільш критичними в точці загального приєднання (PCC), де їхній вплив на електричну мережу визначається режимом максимального навантаження споживача. З огляду на це в IEEE Std 519-2022 [4] для оцінювання гармонічних спотворень струму в PCC введено показник загального спотворення попиту (англ. Total Demand Distortion, TDD), який нормується відносно струму максимального попиту, усередненого за типовий інтервал 15–30 хв.

Загальне спотворення попиту визначається виразом

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{(h)}^2}}{I_{load}}$$

де $I_{(h)}$ – діюче значення h -тої гармоніки струму, I_{load} – струм максимального попиту в точці PCC.

Показник TDD використовується в IEEE Std 519-2022 [4] як базовий нормувальний критерій струмових гармонічних спотворень, оскільки він безпосередньо пов'язаний з реальним навантаженням споживача та адекватно відображає його вплив на мережу.

Єдиний показник, що враховує величини початкових фаз між основними гармоніками напруги та струму є коефіцієнт потужності, який дозволяє оцінити частку активної потужності у повній при передачі електроенергії у колах синусоїдного струму та для певних випадків роботи кола може бути розрахований як косинус кута фазового зсуву між синусоїдними напругою та струмом. У нормативній базі США, IEEE Std 1459-2025 [3], введено параметр коефіцієнту зміщення потужності (англ. Displacement Power Factor, DPF), який визначається як косинус кута зсуву фаз між фундаментальними гармонічними складовими напруги і струму:

$$DPF = \cos \Theta,$$

де $\Theta = \psi_{u(1)} - \psi_{i(1)}$ – кут фазового зсуву між основними гармоніками напруги та струму.

Проте розрахунковий вираз такого параметру підкреслює обмеження показника DPF в умовах високого рівня гармонічних спотворень.

Класична теорія та сучасні дослідження [11] підкреслюють важливість врахування фазових зсувів між усіма гармонічними складовими при аналізі активної потужності. Відомі дослідження демонструють, що кути фазового зсуву між основними гармоніками змінюються під впливом кута керування тиристорами [16].

Для оцінки ефективності електроспоживання застосовується поняття істинного коефіцієнта потужності (англ. True Power Factor, TPF) IEEE Std 1459-2025 [3], який враховує не лише фазовий зсув між основними гармоніками, а й вплив гармонічних спотворень струму. Аналітичний вираз для визначення показника TPF має вигляд:

$$TPF = DPF \cdot DF_i = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_i)^2}} \cos \Theta.$$

Проведений аналіз нормативних документів та наукових джерел дозволяє виділити, що комплексна оцінка якості електричної енергії в сучасній нормативній та науково-технічній практиці переважно зводиться до аналізу спектрального складу амплітуд гармонічних складових напруги та струму. При цьому в більшості країн нормування показників якості електроенергії здійснюється головним чином відносно напруги мережі, тоді як показники струму розглядаються в обмеженому нормативному контексті.

Аналіз математичних виразів, що набули широкого застосування для енергетичної та метрологічної оцінки електричних режимів (RMS, Individual Harmonic Distortion, THD, Distortion Factor, Displacement Power Factor, True Power Factor, Total Demand Distortion), демонструє обмеження унормованих показників врахуванням виключно амплітудних величин гармонічних складових. Початкові фази гармонік напруги та струму, а також їх взаємні фазові співвідношення, у зазначених показниках явно не враховуються.

Як наслідок, наведені показники не відображають інформацію про геометрію форми часової залежності електричних величин. Це може обмежувати їх застосування для детального аналізу несинусоїдних режимів, оскільки різні по формі криві можуть мати ідентичні спектральні та інтегральні показники.

Водночас саме форма кривої напруги та струму, зумовлена поєднанням амплітудних і фазових характеристик гармонічних складових, є одним із визначальних чинників інтенсивності часткових розрядів і, відповідно, процесів електричного старіння твердої ізоляції електротехнічного обладнання [17-19].

Методика проведення дослідження щодо впливу початкових фаз гармонічних складових на геометрію кривої струму. Для системного аналізу впливу гармонічних складових на геометрію часової кривої сигналу струму дослідження виконувалося шляхом поетапного спотворення синусоїдальної форми сигналу окремими вищими гармоніками 3-го, 5-го, 7-го та 9-го порядків. Кожна гармонічна складова розглядалася незалежно, без урахування її сумісної дії з іншими гармоніками для встановлення характерних закономірностей індивідуальних впливів кожної гармонічної складової на результуючу форму сигналу.

У всіх розглянутих випадках початкова фаза фундаментальної (першої) гармоніки приймалася рівною нулю. Для кожної вищої гармоніки аналіз проводився для трьох характерних значень початкової фази: 0° , 60° та 180° .

Амплітудний рівень кожної вищої гармонічної складової задано у відносних величинах за допомогою показника індивідуального гармонічного спотворення ($\eta_{(n)}$). Для кожної комбінації порядку гармоніки та її початкової фази розглядалося п'ять характерних рівнів гармонічного спотворення. Перший рівень обрано у відповідності до нормативно допустимих значень індивідуального гармонічного спотворення окремих гармонік прийнятих для напруги мережі [3]: для

3-ї та 7-ї гармонік – $\eta_{(3)} = \eta_{(7)} = 0.05$, для 5-ї гармоніки – $\eta_{(5)} = 0.06$, для 9-ї гармоніки – $\eta_{(9)} = 0.015$. Другий рівень становив $\eta_{2(3)} = \eta_{2(5)} = \eta_{2(7)} = \eta_{2(9)} = 0.08$, що відповідає типовому граничному значенню загального гармонічного спотворення, що використовується у практиці оцінювання якості електроенергії. Для дослідження зміни геометрії часової кривої за умов істотного відхилення від нормативних режимів, додатково аналізуються підвищені рівні гармонічних спотворень, задані значеннями індивідуального гармонічного спотворення на рівнях 0.1, 0.3 та 0.4.

З урахуванням результатів опублікованих у низці робіт, де відзначається, що при підключенні нелінійних навантажень індивідуально чи у певних комбінаціях до однієї з фаз низьковольтної мережі форма напруги, як правило, залишається близькою до синусоїдальної, тоді як форма струму характеризується підвищеним вмістом вищих гармонічних складових. При цьому експериментально фіксується, що фазний струм мережі при паралельному підключенні кількох нелінійних навантажень може мати менший рівень гармонічних спотворень порівняно з випадками індивідуального підключення. Водночас детальний аналіз причин такого ефекту, зокрема ролі фазових співвідношень між гармонічними складовими, у цих дослідженнях ще потребує уваги.

З огляду на це, у даному дослідженні додатково розглядається випадок одночасної дії 3-ї, 5-ї, 7-ї та 9-ї гармонічних складових струму. Аналіз виконано для різних комбінацій початкових фаз зазначених гармонік за умови збереження однакового значення показника загального гармонічного спотворення (THD) результуючих кривих. Такий підхід дозволив відокремити вплив фазових співвідношень між гармонічними складовими на форму часової кривої струму при фіксованому амплітудному спектрі та дати первинне пояснення ефектам, які не відображаються традиційними інтегральними показниками якості електроенергії.

Використання унормованих розрахункових виразів для показників якості електроенергії дозволяють встановити вплив відносного гармонічного спектру від допустимого значення до рівня 80% на взаємоз'язок ефективного значення та THD (рис. 1).

Результати дослідження впливу початкової фази вищих гармонічних складових на геометрію часової кривої струму проаналізовано на основі сімейств часових діаграм, наведених у таблиці 1. Таблиця містить 12 графічних зображень, кожне з яких відображає результуючі криві струму для

фіксованого порядку вищої гармоніки за різних значень її початкової фази та амплітуди.

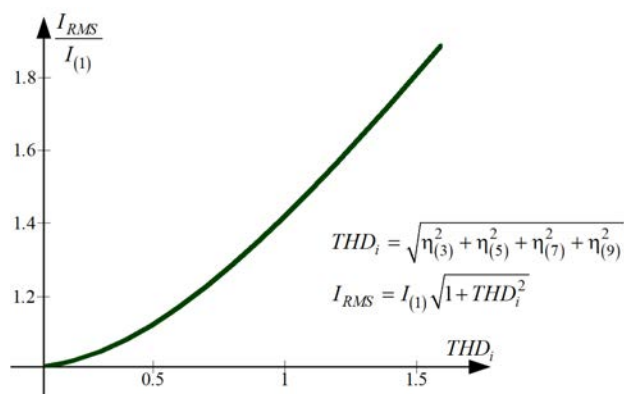


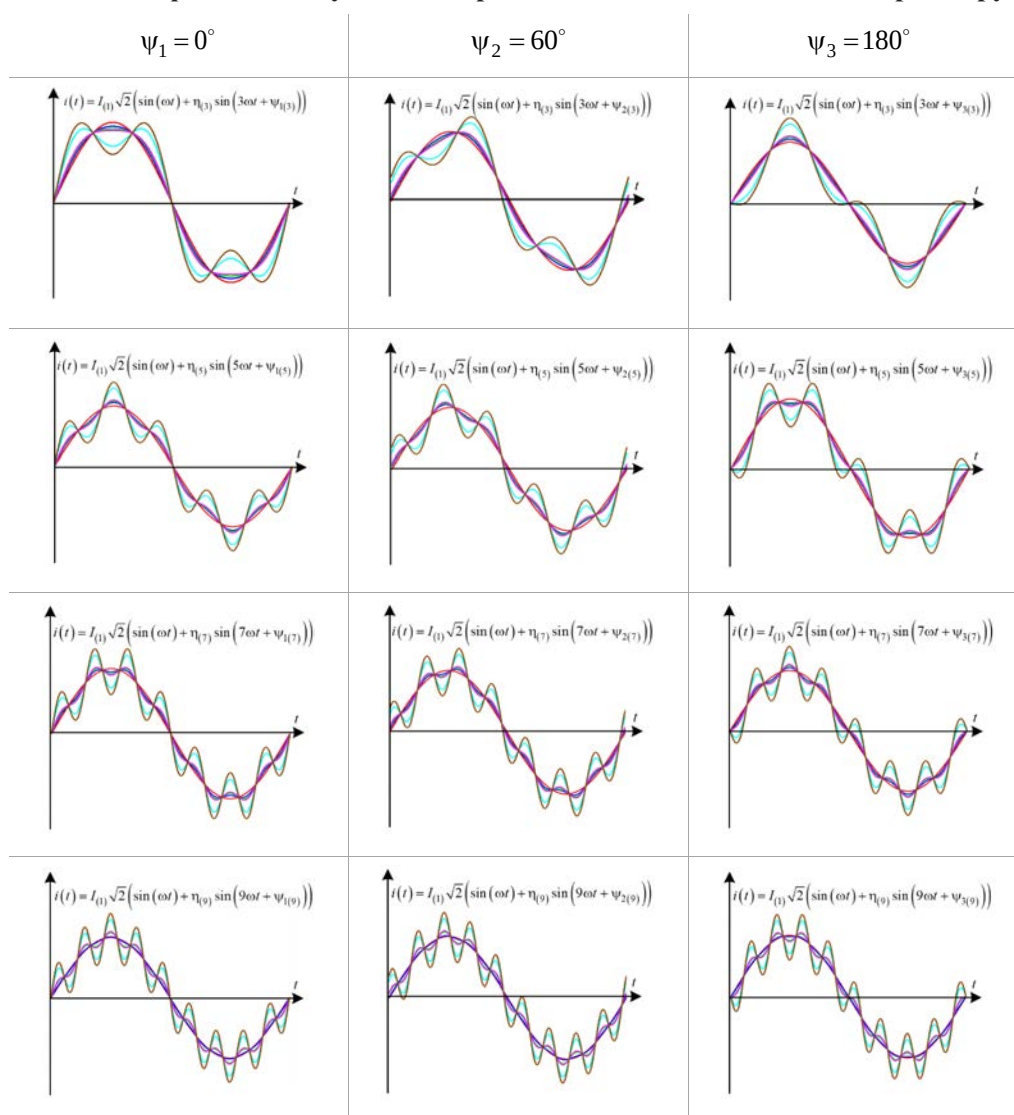
Рис. 1. Вплив індивідуальних гармонік 3-го, 5-го, 7-го та 9-го порядків на взаємозв'язок між ефективним значенням струму та коефіцієнтом гармонічних спотворень (THD)

Часові діаграми у першому ряді таблиці 1 ілюструють зміну форми часової кривої струму при спотворенні синусоїди виключно 3-ю гармонікою для п'яти значень показника індивідуального гармонічного спотворення: 0,05; 0,08; 0,10; 0,30; 0,40. Другий ряд відповідає аналогічному аналізу для 5-ї гармоніки за рівнів індивідуального гармонічного спотворення: 0,06; 0,08; 0,10; 0,30; 0,40. У третьому ряду наведено результати для 7-ї гармоніки при значеннях індивідуального гармонічного спотворення: 0,05; 0,08; 0,10; 0,30; 0,40. Четвертий ряд відображає вплив 9-ї гармоніки за рівнів індивідуального гармонічного спотворення: 0,015; 0,08; 0,10; 0,30; 0,40.

Аналіз отриманих часових діаграм демонструє, що за умов накладання фундаментальної та вищої гармонічних складових, коли їх максимуми миттєвих значень відповідних гармонік

Таблиця 1

Вплив початкової фази індивідуальних гармонічних складових на геометрію струму мереж



збігаються, результуюча крива струму зберігає симетрію відносно осі часу та осі ординат. Такі випадки характерні з кроком чотири порядки: при нульових початкових фазах починаючи з 5-ї гармоніки та при початкових фазах 180° починаючи з 3-ї гармоніки. У таких випадках зі зростанням рівня індивідуального гармонічного спотворення спостерігається деформація кривої на рівні амплітудних значень фундаментальної гармоніки, що проявляється як «витягування». При цьому припускається, що приріст максимального значення спотвореного струму індивідуальною гармонічною складовою можна оцінити як:

$$I_{\max(n)} = I_{(1)} \sqrt{2} \cdot (1 + m_{\text{норм}(h)}),$$

де: $m_{\text{норм}(h)}$ – нормативна величина індивідуального гармонічного спотворення відповідної вищої гармоніки; n – будь-яке невід’ємне дійсне число, яке кількісно вказує на рівень відхилення відносної амплітуди вищої гармонічної складової від нормованого значення; $I_{\max(n)}$ – максимальне значення спотвореного струму мережі; $I_{(1)}$ – ефективне значення основної гармоніки струму мережі; $\Delta = 1 + m_{\text{норм}(h)}$ – приріст максимального значення струму за умови, що амплітуди основної та вищої гармонічних складових збігаються.

Для 3-ї гармоніки характерним є формування ділянок локального сплюснення кривої поблизу моментів переходу струму через нуль. Спотворення струму 5-ю, 7-ю та 9-ю гармоніками характеризується появою коливальних відхилень навколо синусоїди фундаментальної гармоніки вздовж усього періоду.

За умов накладання фундаментальної та вищої гармонічної складових, коли додатний

максимум фундаментальної гармоніки збігається з від’ємним максимумом відповідної вищої гармоніки, результуюча крива струму характеризується локальним «просіданням» відносно амплітуди основної гармоніки. Зазначений тип деформації спостерігається з періодичністю, що відповідає зміні порядку гармоніки через чотири, зокрема: для нульових початкових фаз – починаючи з 3-ї гармоніки, а для початкових фаз 180° – починаючи з 5-ї гармоніки. З підвищенням рівня індивідуального гармонічного спотворення деформація кривої струму на рівні амплітуд фундаментальної гармоніки стає більш вираженою. У діапазоні значень індивідуального гармонічного спотворення від нормативно допустимого для відповідного порядку гармоніки до 8 % форма сигналу набуває трапецеїдальної форми. Подальше зростання рівня гармонічного спотворення (понад 8 %) призводить до формування М-подібної геометрії. Крім того, починаючи з 7-ї гармоніки, на результуючій кривій з’являються додаткові проміжні коливання навколо синусоїди фундаментальної частоти. Інтенсивність і кількість таких коливань зростає зі збільшенням порядку гармоніки та рівня індивідуального гармонічного спотворення.

На рис. 2а наведено часові діаграми струму, сформовані одночасним накладанням 3-ї, 5-ї, 7-ї та 9-ї гармонічних складових за різних комбінацій їх початкових фаз. Для всіх трьох випадків амплітуди окремих гармонік є однаковими, що забезпечує однакові значення індивідуальних гармонічних спотворень та загального коефіцієнта гармонічних спотворень, який у всіх випадках становить $\text{THD} = 9,4 \%$.

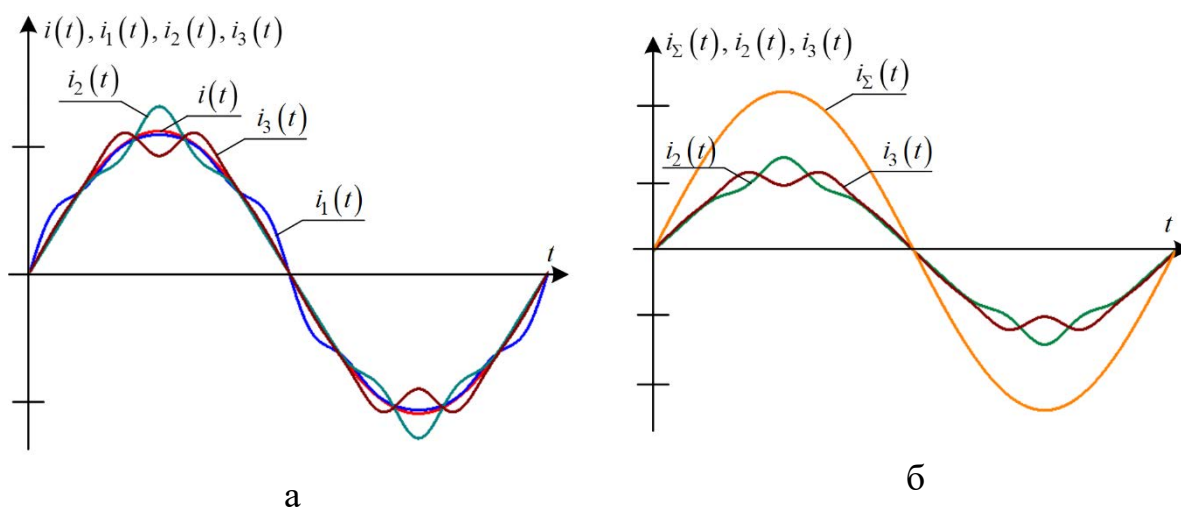


Рис. 2. Часові діаграми струмів спотворених 3-ю, 5-ю, 7-ю та 9-ю гармонічними складовими за різних початкових фаз в координатах фундаментальної синусоїди (а) та часова діаграма результуючого струму в результаті накладання двох спотворених (б)

$$\begin{aligned}
i_1(t) &= I_{(1)} \sqrt{2} \left(\sin(\omega t) + \eta_{(3)} \sin(3\omega t + 0^\circ) + \eta_{(5)} \sin(5\omega t + 0^\circ) + \eta_{(7)} \sin(7\omega t + 0^\circ) + \eta_{(9)} \sin(9\omega t + 0^\circ) \right) \\
i_2(t) &= I_{(1)} \sqrt{2} \left(\sin(\omega t) + \eta_{(3)} \sin(3\omega t + 180^\circ) + \eta_{(5)} \sin(5\omega t + 0^\circ) + \eta_{(7)} \sin(7\omega t + 180^\circ) + \eta_{(9)} \sin(9\omega t + 0^\circ) \right) \\
i_3(t) &= I_{(1)} \sqrt{2} \left(\sin(\omega t) + \eta_{(3)} \sin(3\omega t + 0^\circ) + \eta_{(5)} \sin(5\omega t + 180^\circ) + \eta_{(7)} \sin(7\omega t + 0^\circ) + \eta_{(9)} \sin(9\omega t + 180^\circ) \right)
\end{aligned}$$

У першому випадку $i_1(t)$ початкові фази всіх гармонічних складових прийнято за нульові. З геометричної точки зору: у момент досягнення максимуму фундаментальної гармоніки 3-тя та 7-ма гармоніки перебувають у протифазі, тоді як 5-та та 9-та – у фазі з основною складовою. За цих умов результуюча крива струму не демонструє чітко вираженої амплітудної деформації, однак у часовій області з'являються локальні викривлення. Зокрема, в межах кожної чверті періоду спостерігаються ділянки з різною швидкістю зміни миттєвого значення струму, що призводить до ускладнення геометрії часової кривої.

Для другого випадку $i_2(t)$ початкові фази вищих гармонічних складових обрано таким чином, що їх додатні максимуми збігаються з додатним максимумом фундаментальної гармоніки. За цих умов результуюча крива струму $i_2(t)$ зазнає переважно амплітудної деформації, що проявляється у збільшенні пікових значень без формування виражених додаткових коливань відносно синусоїди основної частоти. Форма сигналу при цьому зберігає плавний характер і не демонструє локальних викривлень, типових для окремих індивідуальних гармонічних спотворень.

За третього випадку $i_3(t)$ від'ємні максимуми вищих гармонічних складових збігаються з додатним максимумом фундаментальної гармоніки. Внаслідок цього результуюча крива струму $i_3(t)$ характеризується зменшенням миттєвих значень у зоні максимумів основної складової, що проявляється як симетричне «просідання» форми сигналу. Аналогічно до попереднього випадку, така деформація має переважно амплітудний характер і не супроводжується появою додаткових високо-частотних коливань у часовій області.

Отримані результати наочно показують, що за фіксованого амплітудного спектра та однакового значення THD геометрія часової кривої струму може істотно змінюватися лише внаслідок перерозподілу фазових співвідношень між гармонічними складовими. Це підтверджує обмежену інформативність інтегральних показників гармонічного спотворення щодо опису реальної форми сигналу та підкреслює роль фазових ефектів у формуванні часових кривих електричних величин.

Для моделювання паралельного підключення двох нелінійних навантажень до однієї фази низьковольтної мережі додатково розглянуто сумарну часову криву струму, сформовану як алгебраїчну

суму струмів, що відповідають другому та третьому розглянутим випадкам фазових співвідношень гармонічних складових ($i_2(t) = i_3(t) + i_2(t)$). Кожен із цих струмів характеризується однакоим амплітудним спектром та значенням загального гармонічного спотворення THD = 9,4 %, проте відрізняється фазовими співвідношеннями між вищими гармоніками. У результаті сумування зазначених струмів формується крива (рис. 2, б), яка у часовій області практично не відрізняється від ідеальної синусоїди фундаментальної частоти. Це свідчить про майже повну взаємну компенсацію вищих гармонічних складових, незважаючи на те, що кожен із окремих струмів має суттєвий рівень гармонічних спотворень, підтверджений однаковими значеннями показника THD.

Отриманий результат показує, що при паралельному підключенні нелінійних навантажень із різними фазовими характеристиками гармонічних складових сумарні спотворення форми струму в часовій області можуть значно зменшуватися, іноді наближаючись до синусоїдальної форми. При цьому традиційні інтегральні показники якості електроенергії, зокрема THD, не завжди відображають такий ефект, оскільки не враховують фазові співвідношення між гармонічними складовими.

Висновки. Аналіз чинних міжнародних і національних нормативних документів (IEC, EN, IEEE, ДСТУ) показав, що сучасна система оцінювання якості електричної енергії базується переважно на інтегральних та спектральних показниках, які враховують амплітудні характеристики гармонічних складових і не забезпечують явного урахування їх фазових співвідношень.

Встановлено, що поширені показники якості електроенергії (THD, h-th Harmonic Ratio, RMS, DF, TDD, DPF, TPF), незважаючи на нормативну закріпленість і широке практичне застосування, не містять інформації про геометрію часових кривих струму та напруги. У результаті електричні сигнали з істотно різною формою можуть характеризуватися однаковими значеннями цих показників.

Чисельне моделювання впливу окремих вищих гармонічних складових 3-го, 5-го, 7-го та 9-го порядків показало, що за фіксованого амплітудного спектра вирішальним чинником формування геометрії часової кривої струму є початкові фази гармонік відносно фундаментальної складової.

Виявлено, що фазове співпадіння максимумів фундаментальної та вищих гармонічних складових призводить переважно до амплітудної дефор-

мації типу «втягування» без появи локальних коливань, тоді як протифазне накладання гармонік зумовлює формування «просідань», трапецеїдальних та М-подібних форм сигналу. Для гармонік вищих порядків додатково спостерігається поява високочастотних локальних коливань у часовій області.

Встановлено, що за однакових значень THD і незмінного амплітудного спектра геометрія часової кривої струму може значно змінюватися виключно внаслідок перерозподілу фазових співвідношень між гармонічними складовими. Це

вказує на обмежену здатність інтегральних показників гармонічного спотворення повністю описувати реальну форму сигналу.

Показано, що при паралельному підключенні нелінійних навантажень із різними фазовими характеристиками гармонічних складових можливе взаємне часткове компенсування гармонік і наближення сумарного струму до синусоїдальної форми, навіть за значних індивідуальних спотворень кожного навантаження. Цей ефект не завжди відображається традиційними показниками якості електроенергії, зокрема коефіцієнтом THD.

Список літератури:

1. Bhattacharyya S., Myrzik J.M.A., Kling W.L. Consequences of poor power quality – an overview. *Proceedings of the 42nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Brighton, UK. 2007. pp. 651-656. DOI: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2007.4469025>.
2. Liu Q., Liu F., Li Y., Wang S. Harmonic modeling and harmonic contribution determination: a case study of industrial power supply system. *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 217. Article 109122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109122>
3. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. – Київ : Міністерство економіки України, 2023. – Національний стандарт України ; введено в дію з 01.03.2025.
4. IEEE Std 519-2022. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – New York, NY, USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2022.
5. ДСТУ IEC 60050-161:2003. Міжнародний електротехнічний словник (IEV). Частина 161. Якість електричної енергії. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – Національний стандарт України ; введено в дію з 01.01.2004.
6. IEEE Std 1459-2025. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – New York, NY, USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025.
7. ДСТУ 3466-96. Якість електричної енергії. Терміни та визначення. – Чинний від 01.01.1998. – Київ : Держстандарт України, 1997. – 96 с. – Прийнято 26.11.1996 ; введено в дію з 01.01.1998 ; скасовано з 01.01.2026 згідно з наказом ДП «УкрНДНЦ» від 29.08.2025 № 163.
8. ДСТУ 2815-94. Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення (IEC 60050-131:1978, NEQ ; IEC 60050-151:1978, NEQ). – Чинний від 01.01.1996. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 51 с. – Прийнято 31.10.1994 ; введено в дію з 01.01.1996 ; скасовано з 01.01.2026 згідно з наказом ДП «УкрНДНЦ» від 29.08.2025 № 163.
9. IEEE Std 446-1995. IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. – New York: IEEE, 1995.
10. Michalec Ł., Jasiński M., Sikorski T., Leonowicz Z., Jasiński Ł., Suresh V. Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality of a low voltage network – review and case study. *Energies*. 2021. Vol. 14. Article 3665. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123665>.
11. Ghorbani M., Mokhtari M.J. Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality and losses in power distribution systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2015. Vol. 5. pp. 166-174. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v5i1.pp166-174>
12. Putz Ł., Bednarek K., Nawrowski R. Disturbances generated by lighting systems with LED lamps and the reduction in their impacts. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Article 4894. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9224894>.
13. Nuñez-Ramírez V., Guerrero-Rodríguez N.F., Batista-Jorge R.O., Mercado-Ravelo R., Ramírez-Rivera F.A., Ferreira J.A., Ramos-Ciprian R.D. Harmonic distortion caused by non-linear household loads: measurement and modelling. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. Article 104483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104483>.
14. De La Rosa, F.C. *Harmonics, Power Systems and Smart Grids*, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015.
15. IEC 61000-3-2:2018. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). – Geneva, Switzerland : International Electrotechnical Commission, 2018.

16. Peretyatko J., Trotsenko Y., Haiko M., Svyatnenko V. Simulation and analysis of the influence of thyristor conduction time in three-phase controlled rectifiers on harmonic distortions in the power supply network. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*. 2025. No. 1. pp. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324268>.
17. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Y. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. Vol. 2. No. 1(40). pp. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.126626>.
18. Florkowski M., Florkowska B. Distortion of partial-discharge images caused by high-voltage harmonics. *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*. 2006. Vol. 153. No. 2. pp. 171-180. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20050008>.
19. Florkowski M., Florkowska B., Zydrón P. Influence of high voltage harmonics on partial discharge patterns modulation. 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Poznan, Poland. 2014. pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2014.7035403>.

Peretyatko Yu. V., Trotsenko Ye. O., Nesterko A. B., Parashchynets A. R. INFLUENCE OF PHASE PARAMETERS OF HARMONIC COMPONENTS ON THE FORMATION OF TIME DEPENDENCES OF ELECTRICAL QUANTITIES

The paper investigates the influence of the amplitude and phase parameters of higher harmonic current components on the geometry of the time curve in low-voltage electrical networks. The relevance of the study is due to the increase in the share of nonlinear loads with power electronics, which leads to the formation of non-sinusoidal modes and deterioration of electrical energy quality indicators. The current regulatory framework in the field of assessing the quality of electricity has been analyzed, in particular the provisions of the DSTU EN 50160, IEEE 519, IEEE 1459 and IEC 60050-161 standards, and it has been established that the modern standardization system is based mainly on integral and spectral indicators, which take into account only the amplitude characteristics of harmonic components. Within the framework of the study, numerical modeling of the phase distortion of the sinusoidal current shape by harmonics of the 3rd, 5th, 7th and 9th orders was performed for different values of individual harmonic distortion and initial phases. It was shown that for a fixed amplitude spectrum, the phase relationship between the harmonic components has a decisive influence on the shape of the time curve. It has been established that the phase coincidence of the maxima of the fundamental and higher harmonics causes mainly amplitude deformation of the signal, while antiphase superposition leads to the formation of subsidence, trapezoidal and M-shaped shapes, and the appearance of local oscillations. It has been proven that for the same values of the total harmonic distortion (THD), the geometry of the time-current curve can differ significantly depending on the phase characteristics of the harmonics. The possibility of mutual compensation of higher harmonic components when connecting nonlinear loads with different phase parameters in parallel is shown, which is not reflected by traditional integral indicators of electricity quality. The obtained results confirm the limited informativeness of existing normalized indicators in describing the real waveform and justify the feasibility of taking into account the phase characteristics of harmonic components when analyzing non-sinusoidal modes.

Keywords: power quality; nonlinear loads; harmonic current distortion; phase relations of harmonics; geometry of time dependence; harmonic distortion coefficient; individual harmonic components.

Дата першого надходження статті до видання: 27.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396:004.75

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/02>

Воронець О.М.

<https://orcid.org/0009-0005-5714-2370>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Пустовойтов П.Є.

<https://orcid.org/0000-0003-3884-0200>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Воронець В.М.

<https://orcid.org/0000-0002-7793-3824>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСУ ЖИТТЯ ВУЗЛІВ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РОЛІ

У статті розглядається задача прогнозування часу життя вузлів бездротових сенсорних мереж в умовах обмежених енергетичних ресурсів та змінного навантаження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підтримання зв'язності мережі, запобігання передчасному виходу з ладу критичних вузлів і забезпечення стабільної роботи розподілених систем спостереження та керування. Запропоновано математичну модель прогнозування, що поєднує аналітичні оцінки енергоспоживання з імовірнісним описом зміни режимів роботи вузлів. Модель враховує функціональну роль вузла в мережі, рівень його навантаження, топологічне положення відносно центра мережі, а також інтенсивність передавання і приймання даних.

У межах дослідження проведено експериментальне моделювання роботи бездротової сенсорної мережі з дванадцятьма вузлами у середовищі OMNeT++. Для кожного вузла задано індивідуальні параметри, що відображають його роль, трафікове навантаження та просторове розташування. На основі розробленої моделі обчислено прогнозований час життя вузлів і виконано порівняльний аналіз отриманих результатів. Результати моделювання представлено у вигляді таблиць, графіків і гістограм, що дозволило виявити характерні залежності між навантаженням, топологічною роллю та тривалістю функціонування вузлів. Додатково побудовано топологічну схему мережі з візуалізацією функціональних ролей.

Запропонований підхід створює основу для розробки адаптивних алгоритмів керування сенсорними мережами, зокрема для динамічного перерозподілу ролей і балансування навантаження. Практичне застосування моделі дозволяє своєчасно виявляти потенційно критичні вузли, підвищувати надійність мережевої інфраструктури та продовжувати загальний життєвий цикл бездротових сенсорних мереж.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, енергоспоживання, час життя вузлів, прогнозування, математична модель, топологія мережі, балансування навантаження, функціональна роль вузла.

Постановка проблеми. Сенсорні мережі є основою для побудови розподілених систем спостереження, контролю та реагування, що функціонують у реальному часі в умовах автономного енергоживлення. Такі мережі широко

застосовуються у сферах моніторингу довкілля, інфраструктури, оборони та медицини, де кожен вузол одночасно виконує функції джерела даних і виконавчого елемента. Обмеженість енергетичних ресурсів сенсорних вузлів зумовлює необ-

хідність не лише мінімізації енергоспоживання, а й точного прогнозування залишкового часу їх функціонування за умов змінного та нерівномірного навантаження.

Прогнозування часу життя вузлів дає змогу завчасно виявляти критичні елементи мережі, схильні до відмов через виснаження енергії, та своєчасно застосовувати заходи для підтримання її працездатності. Це особливо важливо для кластерних голів і ретрансляторів, які зазнають підвищеного навантаження через своє положення в топології. Водночас наявні підходи до оцінювання енергоспоживання часто не враховують стохастичність режимів роботи та вплив топології, що ускладнює точне визначення критичних станів вузлів.

У зв'язку з цим постає науково-прикладна проблема формалізації та розроблення математичної моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі, яка базується на описі їх енергетичного стану, режимів роботи та функціонального навантаження. Розв'язання цієї проблеми створює підґрунтя для побудови адаптивних алгоритмів керування, спрямованих на підвищення надійності, живучості та ефективності функціонування сенсорних мереж у цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженнях бездротових сенсорних мереж (WSN) задача прогнозування часу життя вузлів розглядається як одна з ключових, оскільки вона безпосередньо впливає на стабільність мережі, ефективність керування ресурсами та вибір енергоощадних протоколів. Можливість оцінювання залишкового енергетичного ресурсу дозволяє реалізовувати адаптивні механізми маршрутизації, кластеризації та планування передачі даних.

Математичні моделі прогнозування часу життя вузлів часто базуються на стохастичних процесах, зокрема марковських моделях, які враховують зміну режимів роботи та випадковий характер енергоспоживання вузлів [1]. Такі підходи забезпечують достатньо високу точність прогнозу за умов змінного навантаження, однак їх практичне застосування ускладнюється необхідністю точної оцінки ймовірностей переходів між станами.

Паралельно розвиваються методи прогнозування енергетичних характеристик WSN із використанням алгоритмів глибокого навчання, що демонструють високу адаптивність у динамічних умовах функціонування мережі [2]. Разом з тим нейромережеві моделі мають обмежену інтерпретованість та рідко порівнюються з класичними аналітичними підходами, що ускладнює їх формальний аналіз.

Значна кількість досліджень присвячена енергоефективній кластеризації, зокрема модифікаціям протоколу LEACH та методам вибору голів кластерів з урахуванням залишкової енергії й топологічного положення вузлів [3–5]. Запропоновані рішення дозволяють зменшити енергетичні витрати та вирівняти навантаження в мережі, проте потребують додаткових параметрів налаштування і механізмів глобальної координації.

Проблема збільшення часу життя WSN також розглядається з позицій оптимального проектування топології, зокрема за умов q -покриття та q -зв'язності, що дає змогу підвищити енергоефективність мережі на етапі її розгортання [6]. Водночас такі підходи мають обмежене застосування в динамічних або випадково сформованих топологіях. Для задач кластеризації та маршрутизації також застосовуються метаевристичні алгоритми, які демонструють покращення показників енергоефективності, але характеризуються високою обчислювальною складністю [7].

Узагальнені огляди сучасних енергоефективних технік WSN охоплюють механізми керування енергією, схеми сну та оптимізацію передачі даних, проте значна частина розглянутих рішень має переважно теоретичний характер і не супроводжується ґрунтовною експериментальною валідацією [8]. Перспективним напрямом є використання гібридних підходів, які поєднують аналітичні енергетичні моделі з методами машинного навчання та статистичного аналізу трафіку, що дозволяє підвищити точність прогнозування в умовах неповної інформації [9, 10].

Таким чином, сучасні дослідження демонструють тенденцію переходу до гібридних моделей прогнозування часу життя вузлів WSN, які враховують енергетичні, топологічні та навантажувальні фактори. Водночас задача створення формалізованої, універсальної та обчислювально ефективною моделі прогнозування часу життя вузлів у змінних умовах функціонування мережі залишається актуальною.

Постановка завдання. Енергоспоживання вузлів сенсорної мережі є ключовим фактором, що визначає її життєздатність у часі. Враховуючи гетерогенність ролей вузлів, змінне навантаження, топологічне положення та режимну активність, постає задача побудови математичної моделі, яка дозволяє здійснювати прогнозування залишкового часу роботи кожного вузла. Модель має враховувати як детерміновані характеристики (обсяг трафіку, відстань до центра), так і ймовірнісні аспекти – зокрема, зміну режимів роботи та рольову ієрархію у структурі кластерної мережі.

Прогнозування часу життя вузлів дозволяє не лише формувати картину енергетичного стану системи в реальному часі, а й приймати управлінські рішення щодо переналаштування ролей, перебудови маршрутів та перерозподілу трафіку. В рамках дослідження передбачається створити формалізований підхід до моделювання енергоспоживання, що дозволяє визначати часові інтервали до критичних подій (виснаження вузлів) з точністю, достатньою для реалізації адаптивних протоколів керування мережею.

Метою даного дослідження є розробка математичної моделі, яка дозволяє здійснювати точне прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі з урахуванням функціональної ролі вузла, його навантаження, топологічного положення та режимів роботи. Передбачається побудова універсального підходу, що інтегрує як енергетичні, так і стохастичні характеристики роботи вузлів, дозволяючи прогнозувати момент їх виходу з ладу заздалегідь.

Запропонована модель має забезпечити можливість багатофакторного оцінювання життєвого циклу вузлів в умовах змінної активності, неоднорідного трафіку та ієрархічної структури мережі. Очікується, що реалізація такого підходу дозволить підвищити ефективність планування ресурсів у сенсорних мережах, своєчасно виявляти потенційно критичні зони з високим ризиком втрати енергетичного ресурсу та забезпечити підтримку цілісності й стабільності роботи мережевої інфраструктури.

Виклад основного матеріалу

Формалізація моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі

Розробка аналітичної моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі базується на врахуванні як детермінованих параметрів роботи вузлів, так і ймовірнісних характеристик їх функціонування у різних режимах. Особливістю сенсорної мережі є нерівномірність навантаження вузлів залежно від їх ролі, топологічного положення та функціонального призначення. Це вимагає поєднання класичних моделей енергоспоживання з розширеним стохастичним описом поведінки мережі.

Початково модель базується на класичному підході до оцінки витрат енергії вузла у процесі передачі та прийому даних. Початкова енергія вузла позначається як E_0 , а залишкова енергія у момент часу t – як $E(t)$. Витрати енергії вузла при передачі пакету розміром k біт на відстань d визначаються за формулою:

$$E_{tx} = k \cdot E_{elec} + k \cdot \epsilon_{amp} \cdot d^\alpha, \quad (1)$$

де E_{elec} – енергозатрати електроніки на обробку одного біта інформації,

ϵ_{amp} – коефіцієнт енергетичних втрат підсилювача сигналу, α – показник середовища, що характеризує згасання сигналу.

Витрати енергії на прийом пакету розміром k біт описуються співвідношенням:

$$E_{rx} = k \cdot E_{elec}, \quad (2)$$

Загальні витрати енергії вузлом за час t визначаються як:

$$E(t) = E_0 - (n_{tx} \cdot E_{tx} + n_{rx} \cdot E_{rx}), \quad (3)$$

де n_{tx} – кількість переданих пакетів, а n_{rx} – кількість прийнятих пакетів вузлом.

Важливою особливістю моделі є урахування ролі вузла у структурі мережі. Для цього вводиться коефіцієнт функціонального навантаження R_i , який враховує належність вузла до відповідної категорії: звичайний вузол, ретранслятор чи голова кластера. Це дозволяє деталізувати модель витрат енергії з урахуванням ролі:

$$E'(t) = R_i \cdot (n_{tx} \cdot E_{tx} + n_{rx} \cdot E_{rx}), \quad (4)$$

На основі цього час життя вузла визначається за формулою:

$$T_i = \frac{E_0}{R_i \cdot (n_{tx} \cdot E_{tx} + n_{rx} \cdot E_{rx})}. \quad (5)$$

Додатково у моделі враховується топологічне положення вузла у сенсорній мережі. Вузли, розташовані ближче до центра мережі, мають більше навантаження за рахунок ретрансляції даних. Для цього вводиться коефіцієнт топологічної важливості:

$$R_i(d) = R_i \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{d_{max} - d_i}{d_{max}} \right), \quad (6)$$

де d_i – відстань вузла i до центра мережі, d_{max} – максимальна відстань у межах мережі, β – ваговий коефіцієнт впливу розташування вузла.

Таким чином, розширена формула для прогнозу часу життя вузла з урахуванням енергетики, ролі та топології набуває вигляду:

$$T_i = \frac{E_0}{R_i(d) \cdot (n_{tx} \cdot E_{tx} + n_{rx} \cdot E_{rx})}. \quad (7)$$

Для більш реалістичного опису функціонування сенсорної мережі у роботі розглядається ускладнений варіант моделі, що базується на стохастичному підході. Передбачається, що вузол може перебувати у кількох основних станах: передача даних S_1 , прийом даних S_2 , режим очікування S_3 , режим сну S_4 .

Зміна станів вузла моделюється за допомогою марковської моделі з матрицею ймовірностей переходу між станами P .

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Середній час перебування вузла у стані S_j описується як:

$$T_j = \frac{1}{\lambda_j}, \quad (9)$$

де λ_j – інтенсивність переходу у стан S_j .

Сумарні енергетичні витрати вузла за час t з урахуванням імовірнісної зміни станів описуються інтегральним співвідношенням:

$$E(t) = \int_0^t \sum_{j=1}^4 P_j(\tau) \cdot e_j d\tau,$$

де $P_j(\tau)$ – ймовірність перебування вузла у стані S_j у момент часу τ , e_j – енергетичні витрати вузла у стані S_j .

Враховуючи додатковий коефіцієнт ролі вузла у мережі:

$$K_r = 1 + \gamma \cdot (R_i - 1), \quad (11)$$

де γ – ваговий коефіцієнт впливу ролі, кінцева формула для прогнозу часу життя вузла набуває інтегрального вигляду:

$$T_i = \frac{E_0}{K_r \cdot \int_0^t \sum_{j=1}^4 P_j(\tau) \cdot e_j d\tau}. \quad (12)$$

Запропонована узагальнена математична модель дозволяє прогнозувати час життя вузлів сенсорної мережі з високою точністю, враховуючи множину важливих факторів: топологічне положення, функціональну роль, енергетичні характеристики та стохастичний характер функціонування мережі.

Експериментальне дослідження роботи сенсорної мережі з використанням розробленої моделі

З метою перевірки працездатності та ефективності запропонованої аналітичної моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі було проведено експериментальне моделювання у середовищі OMNeT++. Було обрано мережу, яка складається з дванадцяти сенсорних вузлів, кожен з яких виконує різні функціональні ролі у мережі та характеризується власним енергетичним профілем, навантаженням та топологічним положенням.

Мережа моделювалася у вигляді радіальної структури з центром у вигляді базової станції. Вузли розташовувалися на різних відстанях від

центру, що дозволяє враховувати топологічний вплив на їх енергетичні витрати. Для вузлів були задані три ролі: звичайний вузол, ретранслятор та голова кластера. Розподіл ролей, відстань до центра мережі, кількість переданих та прийнятих пакетів для кожного вузла задавались відповідно до умов симуляції.

В якості початкових параметрів симуляції використовувалася початкова енергія вузла $E_0 = 2 \text{ Дж}$, параметри передачі та прийому даних відповідали типовим значенням для сенсорних мереж: $E_{elec} = 50 \text{ нДж} / \text{біт}$, $\epsilon_{amp} = 100 \text{ нДж} / \text{біт} / \text{м}^2$, коефіцієнт середовища $\alpha = 2$. Розмір пакету становив 512 біт.

Вузли генерували трафік з різною інтенсивністю, яка залежала від їх ролі у мережі. Голови кластерів та ретранслятори мали більшу кількість оброблюваних повідомлень, що відповідно призводило до зменшення їхнього часу життя. Віддалені вузли при меншому навантаженні демонстрували довший життєвий цикл.

Результати моделювання були представлені у вигляді таблиці, яка містила інформацію щодо кожного вузла: його роль, відстань до центра мережі, кількість переданих та прийнятих пакетів, а також розрахований час життя. За результатами симуляції були побудовані графіки залежності часу життя вузла від його відстані до центра мережі та кількості переданих повідомлень.

Аналіз результатів експерименту показав чітку залежність часу життя вузлів від їх розташування та навантаження. Найменший час життя продемонстрували голови кластерів та ретранслятори, розташовані поблизу центра мережі. Найдовший час роботи був характерний для звичайних вузлів з мінімальним навантаженням, розташованих на периферії мережі.

У таблиці 1 наведено експериментальні дані щодо параметрів роботи вузлів сенсорної мережі, які використовувались у процесі моделювання. Для кожного вузла вказано його функціональну роль у мережі, відстань до центра мережі, кількість переданих та прийнятих повідомлень, а також розрахований час життя вузла на основі запропонованої математичної моделі.

Аналіз таблиці дозволяє зробити висновок, що найбільший час життя демонструють звичайні вузли, які розташовані на більшій відстані від центра мережі та мають незначне навантаження. Натомість голови кластерів та ретранслятори характеризуються підвищеним енергоспоживанням через необхідність обробки та ретрансляції значних обсягів даних, що призводить до суттєвого зменшення їхнього часу роботи.

Експериментальні дані щодо параметрів роботи вузлів сенсорної мережі та розрахованого часу їх життя

Вузол	Роль	Відстань до центру (м)	Передач	Прийомів	Час життя (год)
Node 1	Звичайний	39	108	33	284,6
Node 2	Голова кластера	47	64	118	168,0
Node 3	Ретранслятор	11	100	89	242,3
Node 4	Ретранслятор	73	157	43	183,2
Node 5	Звичайний	69	104	143	203,9
Node 6	Звичайний	30	113	38	289,2
Node 7	Звичайний	42	180	119	207,0
Node 8	Голова кластера	85	100	82	145,6
Node 9	Ретранслятор	67	184	31	181,8
Node 10	Ретранслятор	31	70	113	224,1
Node 11	Звичайний	98	122	121	185,4
Node 12	Голова кластера	58	67	140	152,9

На рисунку 1 представлено топологію сенсорної мережі, яка використовувалась у процесі експериментального моделювання. Мережа складається з дванадцяти сенсорних вузлів, які мають різні функціональні ролі: голови кластерів, ретранслятори та звичайні вузли. Центральний вузол виконує роль базової станції та безпосередньо підключений до голів кластерів, які у свою чергу забезпечують обслуговування вузлів нижчого рівня.

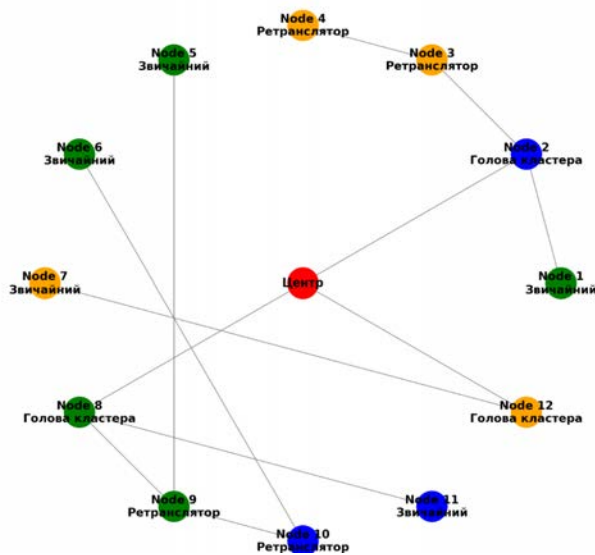


Рис. 1. Топологія сенсорної мережі з урахуванням ролей вузлів

На рисунку 1 вузли відображено з урахуванням їх ролей: голови кластерів з'єднані з центральним вузлом, ретранслятори здійснюють передачу даних між звичайними вузлами та кластерними головами або іншими вузлами мережі, а звичайні вузли підключаються до найближчих ретрансля-

торів чи голів кластерів. Така організація топології забезпечує зменшення навантаження на центральний вузол та дозволяє більш рівномірно розподіляти енергетичні витрати між вузлами мережі.

Отримані експериментальні результати підтвердили адекватність та ефективність запропонованої математичної моделі прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі. Проведене моделювання показало можливість її використання для практичної оцінки та оптимізації енергетичних характеристик реальних сенсорних мереж.

Графічний аналіз результатів моделювання

На гістограмі на рис.2 представлено розподіл часу життя вузлів сенсорної мережі. Видно, що більшість вузлів мають час життя у межах від 200 до 300 годин, що відповідає середньому навантаженню та типовим ролям «звичайного вузла» чи «ретранслятора». Менша кількість вузлів демонструє тривалість життя понад 300 годин – це, як правило, вузли, що мають мінімальне енергоспоживання та розташовані на периферії мережі. Найменший час життя зафіксовано у вузлів із найвищим навантаженням, зокрема голів кластерів.

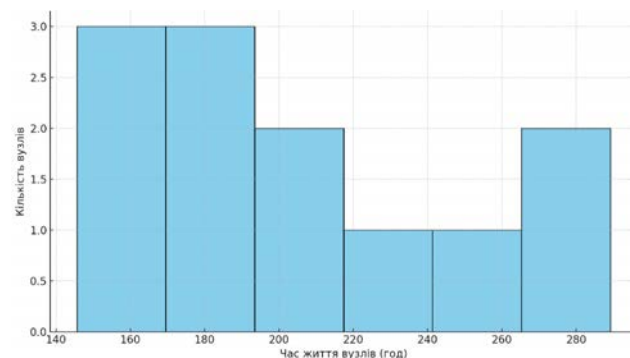


Рис. 2. Гістограма розподілу часу життя вузлів сенсорної мережі

На гістограмі на рис. 3 зображено розподіл відстаней вузлів до центра мережі. Розташування вузлів у моделі здійснювалося рівномірно, що підтверджується відносно однорідним розподілом. Наявність вузлів у всіх віддалених зонах дозволила провести об'єктивний аналіз впливу топологічного розташування на енергоспоживання. Це також є підтвердженням симетричності моделі та достатньої репрезентативності вибірки для експерименту.

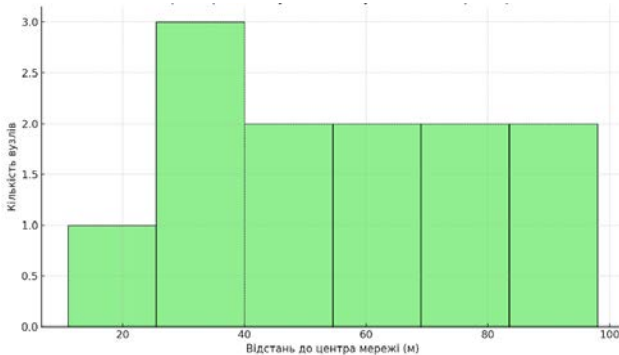


Рис. 3. Гістограма розподілу відстані вузлів до центра мережі

Гістограма на рис. 4. відображає розподіл навантаження на вузли, що визначається сумою переданих та прийнятих пакетів даних.

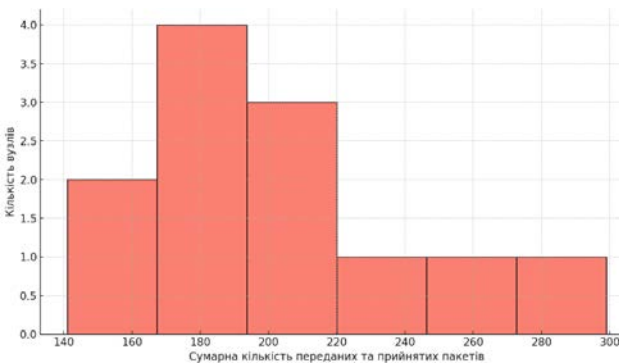


Рис. 4. Гістограма розподілу сумарного навантаження на вузли (кількість переданих та прийнятих пакетів)

Спостерігається значна варіативність навантаження: частина вузлів передає та приймає незначний обсяг трафіку, тоді як інші – зазнають інтенсивного навантаження. Такий розподіл відповідає функціональним ролям вузлів: вузли з високим навантаженням найчастіше виступають у ролі голів кластерів або ретрансляторів, що призводить до більшого енергоспоживання та скорочення часу життя.

Висновки. Поставлена у дослідженні мета, що полягала у створенні аналітичної моделі для прогнозування часу життя вузлів сенсорної мережі з урахуванням функціонального навантаження, топологічного положення та змінного режиму роботи, була досягнута. Розроблено математичний апарат, який поєднує класичні енергетичні співвідношення з імовірнісною моделлю станів вузла. У формалізованому вигляді модель дозволяє обчислювати прогнозований час життя на основі кількості переданих і прийнятих повідомлень, відстані до центра мережі, ролі вузла (звичайний, ретранслятор, голова кластера), а також характеристик режимів активності.

Для перевірки моделі проведено симуляційний експеримент, у якому змодельовано сенсорну мережу з 12 вузлів різних типів. Вузли було розподілено по ролях, визначено їх відстань до центра мережі, а також задано кількість переданих і прийнятих повідомлень упродовж заданого проміжку часу. За допомогою моделі для кожного вузла було обчислено прогнозований час життя, що дозволило сформувати повну таблицю параметрів роботи вузлів. Результати показали логічну і фізично обґрунтовану поведінку: голови кластерів та ретранслятори продемонстрували найменший час життя внаслідок підвищеного енергоспоживання, тоді як звичайні вузли з меншим навантаженням мали вищу тривалість роботи.

Експериментальні результати було візуалізовано у вигляді діаграм та гістограм. Побудовано графіки залежності часу життя від відстані до центра мережі та навантаження, які чітко виявили негативну кореляцію між навантаженням і тривалістю роботи. Додатково, створено топологічну схему мережі з позначенням функціональних ролей вузлів, що дозволило відобразити характер маршрутизації трафіку та логіку енергоспоживання в мережі. Гістограми показали характерні розподіли часу життя, навантаження та просторових параметрів мережі, що ще раз підтвердило коректність реалізованої моделі.

Таким чином, побудована модель успішно реалізує функцію прогнозування часу життя вузлів на основі багатофакторного аналізу. Її використання дозволяє не лише відстежувати енергетичний стан системи, а й здійснювати планування перебудови мережі, переобрання кластерних голів та адаптацію протоколів маршрутизації. Модель є придатною для практичного застосування у реальних сенсорних системах, де критично важливо забезпечити стабільну роботу мережі при мінімальних витратах енергії.

Список літератури:

1. Hemalatha. P., Kamalanathan C. A Survey On Enhancing Network Lifetime And Energy Efficiency In Wireless Sensor Networks Using Machine Learning Algorithms. 2025 International Conference on Metaverse and Current Trends in Computing (ICMCTC). Subang Jaya, Malaysia. 2025. P. 1-8. DOI: 10.1109/ICMCTC62214.2025.11196352.
2. Thakur Sumendra, Nurul I. Sarkar, Sira Yongchareon. AI-Driven Energy-Efficient Routing in IoT-Based Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 24. P. 7408. DOI: 10.3390/s25247408.
3. Zhendong Wang, Yaozhong Yang, Xiao Luo, Daojing He, Chan Sammy. Energy efficient clustering and routing for wireless sensor networks by applying a spider wasp optimizer. *Ad Hoc Networks*. 2025. Vol. 174. P. 103841. DOI: 10.1016/j.adhoc.2025.103841.
4. Nkemeni V., Mieveville F., Kuaban G.S., Czekalski P., Tokarz K., Nsanyuy W.B., Deussom Djomadji E.M., Katche M.L., Tsafack P., Zieliński B. Evaluation of Green Strategies for Prolonging the Lifespan of Linear Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no.21. P. 7024. DOI: 10.3390/s24217024.
5. Воронець О. М., Пустовойтов П. Є. Метод формування зон покриття сенсорної мережі з нерівномірною щільністю вузлів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2025. № 2 (24). С. 35-42. doi:10.20998/2413-4295.2025.02.056.
6. Muhammad Suhail Shaikh, Chang Wang, Senlin Xie, Gengzhong Zheng, Xiaoqing Dong, Shuwei Qiu, Mohd Ashraf Ahmad, Saurav Raj. Coverage and connectivity maximization for wireless sensor networks using improved chaotic grey wolf optimization. *Scientific reports*. 2025. Vol. 15. Art. 15706. DOI: 10.1038/s41598-025-00184-2.
7. П. Є. Пустовойтов, О. М. Воронець. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахування QoS та енергозбереження. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання*. 2025. Т. 1, № 1 (13). С. 64-79. DOI: 10.20998/2411-0558.2025.01.05
8. Gaidhani Abhay R., Amol D. Potgantwar. A Review of Machine Learning-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Network Lifetime. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 59, no. 1. P. 231. DOI: 10.3390/engproc2023059231.
9. Kofi Sarpong Adu-Manu, Nadir Adam, Cristiano Tapparello, Hoda Ayatollahi, Wendi Heinzelman. Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks (EH-WSNs): A Review. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*. 2018. Vol. 14, no. 2 Art. 10. P. 1-50. DOI: 10.1145/3183338.
10. Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D. The speed calculating increasing method of the markov model network node. *Advanced Information Systems*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 13–17. DOI: 10.20998/2522-9052.2021.3.02.

Voronets O.M., Pustovoitov P.Ye., Voronets V.M. ANALYTICAL MODEL FOR PREDICTING THE LIFETIME OF SENSOR NETWORK NODES TAKING INTO ACCOUNT THEIR FUNCTIONAL ROLE

The article considers the problem of predicting the lifetime of wireless sensor network nodes under conditions of limited energy resources and variable load. The relevance of the study is due to the need to maintain network connectivity, prevent premature failure of critical nodes, and ensure stable operation of distributed monitoring and control systems. A mathematical forecasting model is proposed that combines analytical estimates of energy consumption with a probabilistic description of changes in node operating modes. The model takes into account the functional role of the node in the network, its load level, topological position relative to the network center, and the intensity of data transmission and reception.

As part of the study, an experimental simulation of the operation of a wireless sensor network with twelve nodes in the OMNeT++ environment was conducted. Individual parameters were set for each node, reflecting its role, traffic load, and spatial location. Based on the developed model, the predicted lifetime of the nodes was calculated and a comparative analysis of the results was performed. The modeling results are presented in the form of tables, graphs and histograms, which allowed us to identify characteristic dependencies between the load, topological role and duration of node operation. Additionally, a topological network diagram with visualization of functional roles was constructed.

The proposed approach creates a basis for the development of adaptive algorithms for controlling sensor networks, in particular for dynamic role redistribution and load balancing. The practical application of the model allows for timely detection of potentially critical nodes, increasing the reliability of the network infrastructure and extending the overall life cycle of wireless sensor networks.

Keywords: wireless sensor networks, energy consumption, node lifetime, forecasting, mathematical model, network topology, load balancing, functional role of the node.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Зимовченко В.О.<https://orcid.org/0000-0001-9834-8547>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз

Служби безпеки України

ОПТИМАЛЬНИЙ ВИБІР ДЛЯ СТАЦІОНАРНОГО ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІТІЄВИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Літієві акумулятори є основою сучасної цифрової електроніки, їх застосування має широкий спектр, від портативної електроніки до електромобілів. В статті порівнюються три популярні типи: літій-іонні (Li-ion), літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) та літій-титанатні (LTO). Аналіз базується на ключових параметрах: безпека, цикл життя, енергетична щільність, робоча температура, швидкість заряду/розряду та способи застосування. Також розглянуто важливість правильного вибору елемента живлення для використання у різних цифрових пристроях, вплив на їх роботу та ризики неправильного вибору.

Правильно обрати елемент живлення є критичним для забезпечення ефективності роботи, безпеки та економічної доцільності системи. Акумуляторна батарея (далі АКБ) є серцем будь-якого сучасного цифрового пристрою, що визначає його автономність, стабільність та довговічність. Неправильний вибір може призвести до неефективного використання ресурсів, підвищених витрат на заміну його при поломці. В пристроях де потрібна стабільна напруга та струм, потрібно враховувати навантаження, температурний режим та кількість циклів використання. Головне це правильно проаналізувати специфікації пристрою в якому буде використовуватись елемент живлення. Наприклад для дронів дуже важливий високий розряд, а от для сонячних панелей важливим є цикл життя АКБ.

Мікроконтролери, сенсори та дисплеї чутливі до параметрів живлення. Нестабільність або коливання в напрузі можуть спричинити збої в роботі, помилки або навіть перезавантаження пристрою. Неправильний підбір акумулятора буде знижувати його ККД. У системах з мікроконтролерами (Arduino, Raspberry Pi), стабільне живлення запобігає втраті даних під час запису на флеш пам'ять чи MicroSD.

Невдалий підбір акумуляторної батареї може створити суттєві експлуатаційні ризики. Li-ion елементи при механічному пошкодженні або перезаряді можуть здуватися й втрачати герметичність із виділенням літію, що здатне спричинити пошкодження плати пристрою або навіть загоряння. Натомість LiFePO₄ та LTO вирізняються підвищеним рівнем безпеки й краще пристосовані до роботи в умовах підвищених температур.

Висока вартість LTO елементів економічно недоцільна для масового сегмента споживчої електроніки, тоді як використання бюджетних Li-ion рішень у портативних або промислових застосуваннях може спричинити зростання витрат через часту заміну та обслуговування.

Невідповідність типу АКБ умовам експлуатації пришвидшує деградацію та збільшує обсяг відпрацьованих елементів живлення, що ускладнює переробку й підвищує ризики потрапляння літію та важких металів у довкілля.

Правильно підібрана АКБ забезпечує оптимальні експлуатаційні характеристики, мінімізує ризики відмов і підвищує загальну надійність системи.

Ключові слова: енергія, літієві акумулятори, АКБ, Li-ion, LiFePO₄, LTO, живлення, мобільність.

Постановка проблеми. Енергетична революція XXI століття базується на переході від викопних джерел до електроенергії з низьким вуглецевим слідом та на відновлюваних джерелах енергії. Центральною технологією цього переходу є літій-іонні акумулятори. Вони мають різні хімічні властивості, різні характеристики ефективності,

довговічності та безпеки, що обумовлює оптимальний вибір під конкретні задачі. Сучасні наукові та практичні питання включають:

- Правильний підбір типу АКБ під конкретні умови експлуатації.
- Що саме впливає на втрату ресурсу та безпеку.

– Методи оцінки внутрішнього опору, що дають достовірну інформацію про стан АКБ.

Ці питання особливо критичні для розробки надійних систем енергозбереження, вибору електромобілів, портативної техніки, енергетичних сховищ та автономних джерел живлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні кілька років зросла кількість публікацій, що присвячені порівнянню характеристик різних літєвих акумуляторів, зокрема їх поведінці в цифрових системах з різними сценаріями використання.

Енергетична щільність та циклічний ресурс

Аналіз досліджень показує, що традиційні *Li-ion* батареї забезпечують високу питому енергію, що робить їх привабливими для компактних портативних пристроїв [1]. Проте їхній циклічний ресурс суттєво нижчий у порівнянні з альтернативними технологіями, особливо при роботі з глибокими циклами розряду, що є критичним для застосувань із частими заряд-розряд циклами. Наприклад, *LTO* елементи демонструють значно вищий ресурс циклів (до кількох тисяч циклів без істотної деградації) завдяки своїй структурній стабільності та низькій тенденції до утворення активних улагоджених структур у матеріалах електродів.

Термальна та електрична стабільність

У своїх роботах вчені наголошують на значній різниці в термічній поведінці різних типів АКБ [2]. *LiFePO₄* батареї вирізняються високою термічною стабільністю та меншим ризиком теплового розгону порівняно з традиційними *Li-ion* системами, що зменшує ймовірність аварійних ситуацій. *LTO* елементи, завдяки своїй хімічній структурі, взагалі мають мінімальні ризики здуття та теплових подій, що робить їх придатними для застосувань із жорсткими вимогами до безпеки.

Вплив на цифрові системи

Аналіз сучасних публікацій також вказує на те, що нестабільний профіль напруги, викликаний неправильно підібраним акумулятором, може мати критичний вплив на цифрові компоненти: контролери живлення, оперативну пам'ять, накопичувачі даних (*SSD*). У роботах, присвячених цифровим застосуванням, підкреслюється, що коливання напруги живлення можуть спричинити системні збої, особливо у режимі реального часу.

Техніко-економічний баланс

Окрім чисто технічних показників, розглядається також й економічний аспект. *LiFePO₄* та *LTO* показують переваги в довгострокових проєктах за рахунок тривалішого ресурсу та підвищеної безпеки, незважаючи на вищу початкову вартість.

Постановка завдання. Метою даної статті є проведення порівняльного аналізу основних характеристик літєвих акумуляторів типів *Li-ion*, *LiFePO₄* та *LTO*, а також визначення їх придатності для використання у цифрових електронних пристроях з урахуванням параметрів енергетичної щільності, циклічного ресурсу, безпеки та експлуатаційної стабільності.

Дослідження спрямоване на виявлення переваг і недоліків кожної технології та формування рекомендацій щодо раціонального вибору типу акумуляторної батареї залежно від вимог конкретних електронних систем та умов їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу. В умовах стрімкого розвитку портативної та вбудованої цифрової електроніки ключовим елементом, що визначає продуктивність, надійність та довговічність пристрою, є джерело енергії – акумулятор. Серед широкого спектра акумуляторних технологій, літій-іонні (*Li-ion*), літій-залізо-фосфатні (*LiFePO₄*) та літій-титанатні (*LTO*) батареї є найпоширенішими через їх високі питомі характеристики енергії та гнучкість у застосуваннях. Проте кожен із цих типів має ряд специфічних фізико-хімічних властивостей, що безпосередньо впливають на експлуатаційні показники: енергетичну щільність, ресурс циклів, теплову та електричну стабільність.

У пристроях де висока циклічність заряду/розряду традиційні *Li-ion* елементи характеризуються прискореною деградацією елементів живлення, а саме зниженням ємності та зростанням внутрішнього опору вже після 500 – 700 циклів, що зазвичай відповідає 1 – 2 рокам експлуатації. Натомість *LTO* - елементи здатні витримувати від 10000 до 30000 циклів без суттєвої втрати характеристик, що еквівалентно 5 – 10 рокам роботи пристрою.

Класичні *Li-ion* акумулятори (*NMC/NCA*)

Традиційні літій-іонні акумулятори забезпечують у середньому від 500 до 1000 повних циклів заряд/розряд допоки їх залишкова ємність зменшиться приблизно до 80% від початкового номіналу [3]. Саме цей поріг зазвичай приймається як кінець ефективного експлуатаційного ресурсу в більшості застосувань.

Процеси деградації мають комплексний характер і включають:

- поступове зростання внутрішнього опору через старіння електродів;
- розростання міжфазного шару твердого електrolіту (*SEI*) на поверхні графітового анода;
- втрату активного матеріалу електродів (*LAM*, *Loss of Active Material*);

- структурні та хімічні зміни електроліту;
- мікротріщини в катодних частинках під дією циклічних навантажень.

Фізико-хімічна основа роботи цих АКБ – інтеркаляція літію між шарами графітового анода та оксидними катодами, зокрема *нікелю-марганцю-кобальту (NMC, Nickel Manganese Cobalt)* та *нікелю-кобальту-алюмінію (NCA, Nickel Cobalt Aluminum)*. Така конфігурація забезпечує високу гравіметричну щільність енергії – приблизно 150 – 300 (в деяких випадках) Вт·год/кг, що робить їх оптимальними для портативної електроніки та навіть застосуванню в електротранспорті (Tesla, Nisan). Однак висока енергоємність супроводжується підвищеною чутливістю до температури, механічних пошкоджень, глибини розряду та швидкості заряджання.

Літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO₄, LFP)

Акумулятори на основі LFP відомі своєю винятковою довговічністю [4]. Їх ресурс становить від 2000 до 7000 циклів, що робить їх надзвичайно привабливими для систем стаціонарного накопичення енергії, резервного живлення та автономних сонячних установок.

Основні механізми старіння включають:

- втрату запасу циклічного літію (*LLI – Loss of Lithium Inventory*);
- часткову деградацію активної маси електродів;
- повільне зростання внутрішнього опору.

Катод LFP має олівінову кристалічну структуру, яка характеризується високою структурною стабільністю та термостійкістю. У поєднанні з графітовим анодом це формує електрохімічно надійну систему з низькою схильністю до теплового розгону [5].

Переваги у даного типу АКБ наступні:

- висока термостабільність;
- відносно рівномірна (часто майже лінійна) деградація;
- більш безпечні в експлуатації ніж класичні Li-ion АКБ.

Головним недоліком є нижча щільність енергії (90 – 160 Вт·год/кг) у порівнянні з класичними NMC/NCA системами, що обмежує їх використання там, де критично важлива маса або габарити.

Літій-титан-оксидний акумулятор (Lithium Titanate, LTO)

Акумулятори з анодом на основі літій-титанату демонструють найвищий цикл життя серед комерційних Li-ion технологій – від 10000 до 30000 циклів заряду/розряду, а за оптимальних умов експлуатації можливо навіть більше [6].

Ключова причина такої довговічності – так званий ефект «Zero-Strain», тобто відсутність суттєвих об'ємних змін у кристалічній структурі анода під час інтеркаляції та деінтеркаляції літію. Це мінімізує утворенню механічного напруження, утворенню мікротріщин на катоді та деградацію структури електрода.

У LTO акумуляторів анод виконаний з літій-титанату, а катод в більшості випадків на основі NMC або інших оксидних матеріалів.

Через вищий потенціал анода формується нижча робоча напруга комірки, що зумовлює меншу щільність енергії – від 70 до 110 Вт·год/кг.

Проте, це компенсується наступним :

- високою стабільністю циклів заряд/розряд;
- високою швидкістю заряджання;
- широким температурним діапазоном роботи (від -40°C та до +55°C);
- підвищеною безпекою.

Порівняльна характеристика всіх трьох видів АКБ наведена в табл. 1

Таблиця 1
Порівняльна характеристика трьох видів АКБ

Параметр	Li-ion	LiFePO ₄	LTO
Щільність енергії, Вт·год/кг	150 – 300	90 – 160	70 – 110
Номінальна напруга, В	3.6 – 3.7	3.2 – 3.3	2.3 – 2.4
Кількість циклів заряд/розряд	500 – 1000	2000 – 7000	10000 – 30000
Оптимальна робоча темп., °C	20 / 25	20 / 25	0 / 40
Робочий діапазон темп., °C	-20°C/+60	-20°C/+60	-40°C/+55

Неправильний вибір типу елементу живлення може призвести до суттєвих негативних наслідків, серед яких – зниження ресурсу пристрою, втрата працездатності в критичних режимах, підвищені ризики виходу з ладу контролерів живлення або накопичувачів даних, а також загроза термічних подій (перегрів, здуття, термічна нестабільність) [7]. У цифрових системах, що вимагають стабільного профілю напруги, невідповідність характеристик АКБ може стати причиною збоїв у роботі мікроконтролерів, а у медичних чи промислових застосуваннях – критичних відмов.

Отже, виникає потреба в систематичному порівнянні Li-ion, LiFePO₄ та LTO технологій з погляду їх електрохімічних характеристик, теплової безпеки, циклічного ресурсу та впливу на роботу цифрових електронних систем. Саме таке порівняння дозволяє обґрунтовано вибрати оптимальний тип батареї під конкретні технічні вимоги, умов експлуатації та експлуатаційні обмеження.

Внутрішній опір АКБ

Для контролю за нагрівом, потужністю та ефективністю батареї вимірюють її внутрішній опір. Він складається з кількох компонентів: омичної, поляризаційної та дифузійної частин.

Оцінка внутрішнього опору – це елемент тестування та моніторингу комірки батареї в дослідженнях і промислових застосуваннях.

DC-імпульсний метод (DCIR, Direct Current Internal Resistance) є одним із найбільш поширених способів оцінювання внутрішнього опору комірки АКБ [8]. Метод широко використовується в лабораторних дослідженнях, системах керування BMS (Battery Management System), а також у виробничому тестуванні акумуляторів. Його головна мета – визначити, як батарея реагує на короткочасне навантаження постійним струмом і як це впливає на падіння напруги.

Принцип методу полягає у подачі короткого імпульсу постійного струму на акумулятор та вимірюванні миттєвої зміни напруги на його клеммах. При цьому внутрішній опір розраховується на основі закону Ома.

Математична формула має такий вигляд:

$$R_{DC} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

де:

R_{DC} – внутрішній опір акумулятора (DCIR);

ΔV – зміна напруги під час імпульсу струму;

ΔI – величина прикладеного імпульсу струму;

При подачі імпульсу струму відбувається миттєве падіння напруги, яке зумовлене сумарним внутрішнім опором батареї. В таблиці 2 наведені дані для різних типів літєвих АКБ, що характеризують діапазони внутрішнього опору.

Таблиця 2

Діапазони внутрішнього опору літєвих АКБ

Тип акумулятора	DCIR (комірка)
Li-ion (NMC/NCA)	20 – 50 МОм
LiFePO4	30 – 70 МОм
LTO	5 – 20 МОм

З часом експлуатації опір АКБ зростає, що є одним з основних індикаторів деградації батареї. Він суттєво залежить від таких параметрів як температура навколишнього середовища, ступеню заряду (SOC, State of Charge), та станом самої батареї. Наприклад, при зниженні температури різко зростає опір через уповільнення дифузії літію.

Перевагами DCIR є швидкість та простота вимірювання, можливість використання в BMS.

Недоліками даного методу є залежність вимірювання від температури навколишнього середовища та SOC, не має можливості розділити

омичний опір від електрохімічного, менш інформативний, якщо порівнювати з імпедансною спектроскопією (EIS).

Імпедансні вимірювання, або метод електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS, Electrochemical Impedance Spectroscopy), є високоточним інструментом дослідження електрохімічних процесів у акумуляторах [9]. На відміну від DC-методів, що визначають інтегральний внутрішній опір, EIS дозволяє розділити різні складові опору та дослідити кінетику електрохімічних реакцій, дифузію іонів та міжфазні явища.

Метод широко застосовується у наукових дослідженнях для оцінки деградації літій-іонних АКБ, аналізу стану електродів і оптимізації матеріалів.

Суть методу полягає у подачі на акумулятор малого гармонічного сигналу змінного струму або напруги (зазвичай 5 – 10 мВ) у широкому діапазоні частот – від кількох мГц до сотень кГц.

Внаслідок цього на клеммах батареї виникає відповідний змінний сигнал напруги або струму, який має амплітуду та фазовий зсув відносно прикладеного сигналу. На основі цих параметрів визначається комплексний електрохімічний імпеданс:

$$Z_{(\omega)} = \frac{V_{(\omega)}}{I_{(\omega)}}$$

де:

$Z_{(\omega)}$ – комплексний імпеданс;

$V_{(\omega)}$ – амплітуда напруги;

$I_{(\omega)}$ – амплітуда струму;

ω – кутова частота сигналу.

Комплексний імпеданс складається з реальної та уявної частини:

$$Z = Z' + jZ''$$

де:

Z' – активна (омична) складова;

Z'' – реактивна складова, пов'язана з ємнісними та дифузійними процесами.

В таблиці 3, наведені головні переваги EIS з можливістю розділення електрохімічних процесів за характерними частотами.

Таблиця 3

Електрохімічні процеси за характерними частотами

Частотна область	Основні процеси
Високі частоти (від 10 до 100 кГц)	Омичний опір електроліту, контактів та на клеммах АКБ
Середні частоти (1 Гц – 10 кГц)	Перехід заряду на межі електрод-електроліт
Низькі частоти (мГц – 1 Гц)	Дифузія іонів літію в активному матеріалі

Таким чином *EIS* дозволяє окремо дослідити кінетику реакцій та транспорт іонів, що неможливо зробити за допомогою *DC-методів*.

Перевагами *EIS* вимірювання є можливість розділення електрохімічних процесів, висока чутливість до ранніх стадій деградації АКБ, отримання реальної інформації про кінетику реакцій.

Разом з тим метод має певні обмеження та недоліки, а саме складність експериментального обладнання, тривалість вимірювання (на низьких частотах), складність інтерпретації результатів та необхідність використання математичних моделей.

Метод *EIS* використовується для дослідження механізмів деградації акумуляторів, оптимізації катодних і анодних матеріалів, оцінки стану здоров'я батареї (*SoH, State of Health*), аналізу ефективності *SEI-шару*;

АС-імпедансна спектроскопія є одним із найінформативніших методів аналізу літій-іонних АКБ. Вона дозволяє не лише визначити внутрішній опір, але й ідентифікувати окремі електрохімічні процеси, що відбуваються всередині комірки. Саме тому цей метод широко використовується у дослідженнях, розробці нових акумуляторних матеріалів та діагностиці деградації АКБ.

Висновки. В умовах нестабільного електропостачання, сезонних температурних коливань та підвищених вимог до надійності енергетичної інфраструктури виникає необхідність створення ефективних систем накопичення енергії. Одним із ключових елементів таких систем є акумуляторні батареї, від вибору яких залежать енергетична ефективність, безпека, довговічність та вартість експлуатації зарядної станції.

Кожна з представлених у статті технологій має власні технічні характеристики та експлуатаційні особливості, що визначають доцільність їх використання в різних типах енергетичних систем.

Під час проектування зарядної станції необхідно брати до уваги низку чинників, що безпосередньо впливають на ефективність роботи системи накопичення енергії.

Клімат України вирізняється значними сезонними коливаннями температури: приблизно від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ у зимовий період до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ у літній. У таких умовах важливими параметрами акумуляторних систем є стабільність роботи за низьких температур та здатність батареї ефективно заряджатися в холодному середовищі. Акумулятори типу *LTO* демонструють найкращу продуктивність при низьких температурах, тоді як *LiFePO4* і традиційні *Li-ion* батареї в подібних умовах часто потребують застосування систем підігріву.

Для систем резервного електроживлення та зарядних станцій одним із ключових параметрів є кількість циклів заряджання та розряджання, яка безпосередньо визначає термін експлуатації батареї. За середніми показниками найбільшу

довговічність демонструють *LTO* та *LiFePO4* акумулятори. Хоча класичні *Li-ion* батареї мають вищу енергетичну щільність, їхній ресурс зазвичай менший, що робить їх менш придатними для систем із інтенсивним циклічним навантаженням.

Ще одним важливим фактором є швидкість накопичення енергії, особливо в умовах, коли електроенергія подається за графіком або має часові обмеження. Якщо враховувати типовий коефіцієнт швидкості заряджання та розряджання (*C-rate*), то *Li-ion* акумулятори зазвичай заряджаються повільніше (приблизно 1-2C), тоді як *LTO* можуть працювати з набагато більшими значеннями цього показника (до 10C), що забезпечує значно швидший процес заряджання. Акумулятори *LiFePO4* займають проміжну позицію з типовими значеннями близько 3-4C.

Використання *Li-ion* акумуляторів доцільне у випадках, коли визначальними є компактність і мала маса системи. Завдяки високій енергетичній щільності такі батареї широко застосовуються у портативних енергетичних пристроях (Power Bank), мобільній електроніці (смартфони, планшети, фітнес-браслети) та переносних енергетичних станціях.

Натомість *LiFePO4* акумулятори вважаються найбільш універсальним рішенням для стаціонарних систем накопичення енергії. Вони поєднують високий рівень безпеки, значний ресурс роботи та відносно помірну вартість, що робить їх ефективним вибором для домашніх систем резервного живлення, зарядних станцій електротранспорту та телекомунікаційної інфраструктури. Найбільш надійною, але і в той же час дорогою є технологія *LTO*. Маючи безліч переваг, застосування її в портативній електроніці не є доцільним через габарити, вагу та ціну. Але вона чудово себе зарекомендує в швидких зарядних станціях, в військово-промисловому комплексі, системах критичного значення. Вона не боїться різкого перепаду температур та має великий ресурс циклів заряд/розряд.

Аналіз технічних характеристик літєвих акумуляторних технологій показує, що для побудови зарядних станцій в умовах України найбільш доцільним є використання *LiFePO4-акумуляторів* як основного джерела накопичення енергії, оскільки вони забезпечують оптимальний баланс між безпекою, ресурсом, вартістю та стабільністю роботи.

Для систем із високими вимогами до швидкості заряджання та експлуатації в холодному кліматі доцільно використовувати *LTO-акумулятори*, зокрема як буферні накопичувачі.

Li-ion акумулятори залишаються ефективним рішенням для мобільних та компактних енергетичних систем, де важливим є співвідношення маси та енергетичної щільності.

Список літератури:

1. «Що необхідно знати про літій-іонні акумулятори?» сайт URL: https://bosch-tech.net.ua/uk/blog/9_lithium-batteries-uk
2. Михайло Золенко «LiFePO₄: відповіді на найчастіші запитання» сайт URL: <https://ek.ua/ua/post/6308/1157-faqs-about-lifepo4/>
3. В. Д. Латвинський, Р. В. Багач «Дослідження літій-іонних батарей для експлуатації електромобілями при різних температурних умовах» сайт URL: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2024-1-58-64.pdf>
4. Xiaoning Zhang, Pengfei Sun, Shixue Wang «Experimental Study of the Degradation Characteristics of LiFePO₄ and LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O₂ Batteries during Overcharging at Low Temperatures» сайт URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2786>
5. Як правильно заряджати LiFePO₄ сайт URL: https://www.sea.com.ua/ua/rezervne-zhyvlennia/news/ak-pravilno-zaradzatilifepo4/?srsitid=AfmBOoqTxdUuGzrgmK_afBtPiSqt0jBmfGkLyBCtWziIirvT8_IHLKV
6. Christian M. Julien, Alain Mauger «Fabrication of Li₄Ti₅O₁₂ (LTO) as Anode Material for Li-Ion Batteries» сайт URL: <https://www.mdpi.com/2072-666X/15/3/310>
7. BTRY.ENERGY «Повний гайд Li-ion vs LiPo: що за чим, де і чому» сайт URL: https://btry.energy/post/li-ion-vs-lipo-povnyy-gayd-scho-za-chym-de-i-chomu_6c3cdce3?srsitid=AfmBOop0xOMQVzFOagcI5jX8W5Y7wLfDWDipLkyKQ3w6pECi12MnPM-
8. «What is DCIR(Direct Current Internal Resistance) Testing?» сайт URL: <https://www.neware.net/news/dcir-direct-current-internal-resistance-testing-principles-and-methods/230/132.html>
9. З. Д. Ковалюк, І. В. Мінтянський, П. І. Савицький «Електрохімічна імпедансна спектроскопія джерел струму Li/Cu₄Bi₆S₁₁» сайт URL: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/65f50cd7-4449-49fc-95ae-9e85fb1866a4/content>

Zymovchenko V.O. OPTIMAL CHOICE FOR STATIONARY ENERGY STORAGE: A COMPARATIVE ANALYSIS OF LITHIUM BATTERIES

Lithium batteries form the foundation of modern digital electronics and are widely used in applications ranging from portable electronic devices to electric vehicles. This paper compares three widely used battery types: lithium-ion (Li-ion), lithium iron phosphate (LiFePO₄), and lithium titanate (LTO). The analysis is based on several key parameters, including safety, cycle life, energy density, operating temperature, charge/discharge rate, cost, and typical application areas. The importance of selecting an appropriate power source for various digital devices is also considered, along with the impact of battery choice on system performance and the risks associated with improper selection.

Selecting an appropriate power source is critical for ensuring system efficiency, safety, and economic feasibility. A rechargeable battery (hereafter referred to as a battery pack or battery) is the core component of any modern digital device, determining its autonomy, operational stability, and service life. An incorrect choice may lead to inefficient resource utilization and increased costs due to frequent replacement in case of failure. In devices that require stable voltage and current, it is necessary to consider load conditions, operating temperature ranges, and the number of charge–discharge cycles. The key requirement is a proper analysis of the technical specifications of the device in which the battery will be used. For example, in unmanned aerial vehicles (UAVs) a high discharge rate is essential, whereas in solar energy systems the cycle life of the battery is a critical parameter.

Microcontrollers, sensors, and displays are sensitive to power supply parameters. Instability or fluctuations in voltage may cause malfunctions, errors, or even device resets. Improper battery selection may reduce overall system efficiency. In microcontroller-based systems (such as Arduino or Raspberry Pi), stable power supply is particularly important because it prevents data loss during writing operations to flash memory or MicroSD storage.

An unsuitable battery choice may also introduce significant operational risks. Li-ion cells, when mechanically damaged or overcharged, may swell and lose hermetic sealing, potentially releasing lithium compounds that can damage the device circuitry or even cause ignition. In contrast, LiFePO₄ and LTO batteries are characterized by higher safety levels and are better adapted to operation under elevated temperature conditions.

The high cost of LTO cells makes them economically impractical for the mass consumer electronics market, whereas the use of low-cost Li-ion solutions in portable or industrial applications may lead to increased operational expenses due to frequent replacement and maintenance.

A mismatch between the battery type and operating conditions accelerates battery degradation and increases the volume of spent cells, complicating recycling processes and raising the risk of lithium and heavy metals entering the environment.

Proper battery selection ensures optimal operational characteristics, minimizes the risk of failures, and improves the overall reliability of the system.

Keywords: energy, lithium batteries, battery pack, Li-ion, LiFePO₄, LTO, power supply, mobility.

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Калмиков О.С.<https://orcid.org/0009-0002-7397-9785>

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ

У статті розглянуто проблему забезпечення надійності бездротових мереж нового покоління в умовах зростаючої складності їх архітектури, гетерогенності та динамічного характеру параметрів функціонування. Показано, що традиційні підходи до підвищення надійності, засновані на резервуванні та реактивному управлінні ресурсами, є недостатньо ефективними для сучасних мереж 5G/6G, особливо в сценаріях із жорсткими вимогами до затримок і стабільності з'єднання. Обґрунтовано, що зростання щільності користувачів, мобільності трафіку та інтеграції різномірних сервісів потребує переходу до принципово нових механізмів управління, здатних працювати в умовах високої невизначеності та швидкоплинних змін стану мережі.

На основі аналізу сучасних наукових досліджень обґрунтовано доцільність застосування алгоритмів штучного інтелекту як інструмента підвищення адаптивності та стабільності бездротових мереж. Надійність мережі формалізовано як багатовимірний об'єкт інтелектуального управління, що описується сукупністю показників якості обслуговування, їх часовою динамікою та імовірнісними характеристиками деградації. Запропонований підхід дозволяє розглядати надійність не як статичний показник, а як керовану характеристику, інтегровану до цільових функцій управління.

Запропоновано концепцію інтелектуалізованого управління бездротовою мережею, яка реалізує замкнений контур «моніторинг – аналіз – прогнозування – керування» з використанням алгоритмів машинного навчання, глибокого навчання та навчання з підкріпленням. Показано, що інтеграція різних класів алгоритмів штучного інтелекту дозволяє перейти від локальної оптимізації окремих параметрів до системного підвищення надійності функціонування мережі в динамічних умовах експлуатації. Особливу увагу приділено узгодженню прогнозних моделей і механізмів прийняття рішень, що забезпечує проактивний характер керування та зменшення часу реакції на деградаційні процеси.

Отримані результати формують методологічне підґрунтя для подальших експериментальних досліджень і практичної реалізації ШІ-орієнтованих механізмів управління бездротовими мережами нового покоління. Практична значущість роботи полягає у можливості використання запропонованої концепції під час проектування адаптивних систем управління для міських, промислових і критично важливих інфраструктурних сценаріїв застосування.

Ключові слова: бездротові мережі, надійність мережі, штучний інтелект, машинне навчання, інтелектуалізоване управління, якість обслуговування.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток бездротових мереж зв'язку зумовив їх перехід від допоміжної інфраструктури передавання даних до базової складової сучасних інформаційних, кіберфізичних та соціотехнічних систем. Сучасні дослідження підкреслюють, що бездротові мережі вже не обмежуються функціями доступу, а виступають основою для реалізації сервісів Інтернету речей, інтелектуальних транспортних систем та застосувань реального часу, що висувають жорсткі вимоги до стабільності та якості зв'язку [1, с. 2224].

Перехід до мереж п'ятого та наступних поколінь супроводжується суттєвим ускладненням архітек-

тури бездротових систем, зростанням щільності мережевих вузлів та впровадженням нових технологій, зокрема міліметрового діапазону частот і масивних антенних систем. У роботах, присвячених мережам 6G, зазначається, що підвищення продуктивності досягається ціною зростання чутливості мереж до змін середовища та мобільності користувачів, що безпосередньо впливає на надійність функціонування мережі [2, с. 27].

Подальший розвиток концепції бездротових мереж нового покоління привів до активного використання гетерогенних архітектур та розподіленого управління ресурсами. Як показано

в сучасних оглядових дослідженнях, відсутність узгоджених механізмів адаптації в таких мережах ускладнює забезпечення стабільної якості сервісів у динамічних умовах експлуатації [3, с. 3585]. Це зумовлює необхідність пошуку нових підходів до управління мережевими ресурсами з урахуванням складної взаємодії між рівнями мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності та надійності бездротових мереж є застосування алгоритмів штучного інтелекту. Огляд сучасних публікацій свідчить, що методи машинного та глибокого навчання активно використовуються для аналізу мережевого трафіку, прогнозування навантаження та оцінювання стану мережі [4, с. 95]. Такі підходи дозволяють перейти від статичних правил управління до адаптивних механізмів прийняття рішень.

Практичні результати використання алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування показників якості обслуговування підтверджують можливість зниження ймовірності деградації сервісів у мобільних мережах за рахунок проактивного реагування на зміни стану мережі [5, с. 140]. Водночас у складних міських середовищах та сценаріях масового підключення пристроїв проблема надійності набуває системного характеру, що вимагає комплексного підходу.

Значну увагу в сучасних дослідженнях приділено концепції самоорганізованих та самонавчальних бездротових мереж, у яких алгоритми штучного інтелекту використовуються для автоматичного управління ресурсами та підвищення стійкості мережі до відмов [6, с. 5750]. Аналіз таких підходів показує їх потенціал для застосування в умовах високої динаміки та невизначеності.

Разом з тим, результати експериментальних і аналітичних досліджень свідчать, що більшість існуючих рішень зосереджена на окремих аспектах оптимізації, не формуючи цілісної концепції забезпечення надійності бездротових мереж [7, с. 223]. Зокрема, питання інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в архітектуру мережі та їх взаємодії з механізмами управління залишаються відкритими.

Подальший розвиток бездротових мереж, зокрема у напрямі 6G, передбачає активне використання інтелектуальних механізмів управління для забезпечення стабільності функціонування мереж у складних умовах експлуатації [8, с. 7]. У цьому контексті надійність розглядається як інтегральна характеристика, що поєднує показники доступності, затримки та стабільності з'єднання [9, с. 273].

Але попри значний прогрес у застосуванні алгоритмів штучного інтелекту в бездротових мережах, проблема їх системного використання для підвищення надійності залишається актуальною [10, с. 39]. Це зумовлює необхідність узагальнення існуючих підходів та формування концептуальних засад використання штучного інтелекту як інструмента забезпечення надійності бездротових мереж нового покоління [11, с. 9].

Постановка завдання. Надійність бездротових мереж є комплексною характеристикою, що визначає здатність мережі забезпечувати стабільне та безперервне надання послуг у заданих умовах експлуатації. У сучасних мережах нового покоління надійність доцільно розглядати не лише як імовірність безвідмовної роботи окремих елементів, а як інтегральну властивість мережі, що формується сукупністю показників доступності, стійкості до відмов, стабільності затримок та здатності підтримувати задані параметри якості обслуговування в умовах динамічної зміни стану мережі.

У роботі надійність бездротової мережі розглядається як об'єкт інтелектуального управління, стан якого описується багатовимірним вектором мережових параметрів та їх часовою динамікою. З урахуванням високої швидкості змін топології, каналних умов і навантаження в мережах 5G/6G традиційні реактивні механізми управління не забезпечують своєчасного впливу на деградаційні процеси, що обумовлює необхідність проактивного підходу.

Виходячи з цього, задача забезпечення надійності формулюється як задача керування станом бездротової мережі, у якій керуючі рішення повинні формуватися на основі не лише поточних вимірювань, а й прогнозу подальшої еволюції мережових параметрів. Для розв'язання цієї задачі в роботі пропонується використання агентної архітектури, у якій ШІ-агенти здійснюють спостереження, аналіз, прогнозування та формування керуючих впливів з метою максимізації інтегрального показника надійності мережі.

Метою статті є обґрунтування та формування підходу до забезпечення надійності бездротових мереж нового покоління на основі інтелектуалізованого агентного управління, що поєднує аналіз поточного стану мережі, прогнозування її динаміки та адаптивне формування керуючих рішень із використанням алгоритмів штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу. З розвитком мобільних і гетерогенних бездротових мереж поняття надійності набуло системного характеру.

У роботах, присвячених інтелектуальним бездротовим мережам, підкреслюється, що надійність повинна оцінюватися з урахуванням взаємодії між фізичним, мережевим та сервісним рівнями, а також з позиції кінцевого користувача, що дозволяє визначити надійність бездротової мережі не окремими технічними параметрами, а здатністю всієї системи адаптуватися до змінних умов функціонування.

Сучасні бездротові мережі функціонують в умовах високої динаміки, що суттєво ускладнює забезпечення їх надійності. До основних факторів деградації надійності належать зростання щільності абонентських пристроїв, мобільність користувачів, зашумленість радіоканалу та нерівномірність мережевого навантаження [5, с. 136]. Ці фактори призводять до нестабільності з'єднання, збільшення затримок та втрат пакетів.

Класичні підходи до підвищення надійності бездротових мереж базуються на підсиленні структурної стійкості мережі та зменшенні впливу локальних відмов за рахунок резервування і багатопляхового передавання. На мережевому рівні це реалізується через механізми альтернативної маршрутизації, дублювання маршрутів, а також перерозподіл трафіку між сегментами з метою уникнення перевантажень. Хоча такі механізми забезпечують базову відмовостійкість, у динамічних умовах мобільних середовищ вони часто вимагають значної надлишковості та призводять до збільшення службового трафіку, що може погіршувати затримки й стабільність сервісів [1, с. 2226].

У сучасних мережах нового покоління ускладнюється структура транспортного рівня та зростає роль віртуалізованих мережевих компонентів, що змінює природу резервування: воно стає не лише "апаратним", а й "логічним", прив'язаним до віртуальних транспортних/сервісних шарів. Підходи до багаторівневого управління транспортними мережами демонструють, що без узгодження між рівнями (фізичним, транспортним, сервісним) резервування може бути неефективним: надлишковість виникає у "неправильному місці", тоді як вузьке місце залишається неприкритим [10, с. 40]. Це підкреслює потребу в більш гнучких механізмах керування трафіком, ніж суто правилі схеми.

На основі проведеного огляду наукових досліджень можна констатувати, що традиційні підходи мають три системні обмеження:

1) вони є реактивними: мережа переважно реагує на погіршення параметрів постфактум, а не прогнозує його;

2) більшість традиційних схем розроблялась для відносно стаціонарних або слабко динамічних

середовищ (під стаціонарними або слабко динамічними середовищами розуміються мережі, для яких характерний значний часовий розрив між зміною стану мережі та циклом управління, тобто $T_s \gg T_c$). У таких умовах параметри мережі можуть вважатися квазістаціонарними, а традиційні статичні або напівстатичні схеми управління залишаються ефективними), тоді як сучасні мережі характеризуються швидкою зміною топології, каналів та навантаження;

Натомість сучасні бездротові мережі нового покоління функціонують у режимі високої динаміки, для якого виконується умова $T_s \leq T_c$. Це означає, що стан мережі змінюється швидше або співмірно з часом формування та застосування керуючих рішень. У таких умовах реактивні схеми управління втрачають ефективність, оскільки оптимізація виконується для застарілого стану мережі, що призводить до зниження інтегрального показника надійності.

3) гетерогенність мереж (різні радіотехнології, типи сервісів і архітектурні компоненти) призводить до того, що локальна оптимізація окремого сегмента може погіршувати глобальну надійність системи.

Дослідження, присвячені AI-керованим бездротовим мережам, вказують на проблему зниження точності моделей у разі зміни сценаріїв використання або умов поширення радіосигналу [6, с. 5750]. Це призводить до того, що навіть інтелектуальні механізми управління можуть приймати неадекватні рішення, що негативно впливає на надійність мережі.

Надійність бездротової мережі доцільно розглядати як інтегральну характеристику, що відображає здатність мережі забезпечувати задані параметри функціонування протягом часу t . У загальному випадку надійність може бути формалізована у вигляді імовірності безвідмовної роботи:

$$R(t) = P\{T > t\}$$

де T – випадкова величина часу до деградації або відмови мережевого сервісу [1, с. 2285].

Для бездротових мереж нового покоління така оцінка є недостатньою, тому використовується багатокритеріальний підхід. Надійність розглядається як функція ключових показників якості обслуговування:

$$R = f(D, L, P_{loss}, A)$$

де D – затримка передавання даних;

L – варіативність затримки (jitter);

P_{loss} – імовірність втрати пакетів;

A – доступність мережі [2, с. 23].

У практичних задачах часто використовується зважена інтегральна оцінка надійності:

$$R = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot m_i,$$

де m_i – нормалізовані метрики надійності;

w_i – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритет сервісу або сценарію використання [5, с. 139].

Параметри бездротової мережі мають часову залежність і можуть бути представлені як стохастичні процеси:

$$X(t) = \{D(t), L(t), P_{loss}(t), S(t)\}$$

де $S(t)$ – стан мережі у момент часу t [3, с. 3619].

У гетерогенних мережах зміни параметрів відбуваються швидше, ніж цикл традиційного управління, що призводить до втрати актуальності керуючих рішень. У цьому випадку доцільним є прогнозування майбутнього стану мережі:

$$S(t + \Delta t) = F(X(t), X(t-1), \dots, X(t-k))$$

де $F(\cdot)$ – модель прогнозування, що може бути реалізована засобами машинного або глибокого навчання.

Адаптивне управління бездротовою мережею може бути подано у вигляді задачі оптимізації:

$$R(u(t)) \rightarrow \max$$

$$D(t) \leq D_{\max}$$

$$\{P_{loss}(t) \leq P_{\max}$$

$$C(t) \leq C_{res}$$

де $u(t)$ – вектор керуючих дій (розподіл ресурсів, маршрутизація, налаштування параметрів каналу);

$C(t)$ – обчислювальні та мережеві ресурси.

У контексті інтелектуального управління така задача часто формулюється як задача навчання з підкріпленням, де максимізується очікувана сумарна винагорода:

$$J = E \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r(t) \right],$$

де $r(t)$ – функція винагорода, пов'язана з показниками надійності;

$\gamma \in (0, 1)$ – коефіцієнт дисконту.

Таким чином, вимоги до адаптивних механізмів управління зводяться до необхідності поєднання прогнозування, оптимізації та архітектурної інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в процеси управління бездротовими мережами [10, с. 40].

Супервізовані методи машинного навчання застосовуються для прогнозування деградації параметрів бездротової мережі на основі історичних даних, що містять як вхідні ознаки, так і від-

повідні цільові значення. Формально задача прогнозування деградації може бути подана як задача апроксимації функції:

$$\hat{y}(t + \Delta t) = f(x(t)),$$

де $x(t) = [D(t), L(t), P_{loss}(t), SNR(t), \dots]$ – вектор спостережуваних параметрів мережі,

$\hat{y}(t + \Delta t)$ – прогнозований показник деградації або рівень надійності у майбутній момент часу.

Як цільова змінна можуть використовуватися безперервні величини (наприклад, прогноз затримки) і бінарні або багатокласові мітки, що відображають нормальний або деградований стан мережі.

Сучасні дослідження [5, 7] показують ефективність нейронних мереж та ансамблевих методів для задач прогнозування QoS/QoE у мобільних мережах, що дозволяє реалізувати проактивні механізми підвищення надійності.

Несупервізовані методи використовуються у випадках, коли деградаційні стани мережі не мають попередньо розмічених даних або їх кількість є обмеженою. Основною задачею є виявлення аномальних станів, що відхиляються від нормальної поведінки мережі. Формально аномалія визначається як:

$$\|x(t) - \mu\| > \delta$$

де μ – центр або модель нормального стану мережі;

δ – порогове значення відхилення.

У практичних реалізаціях широко застосовуються методи кластеризації, автоенкодера та методи зниження розмірності, які дозволяють формувати компактне подання нормального функціонування мережі. Реконструкційна помилка автоенкодера може бути використана як індикатор деградації:

$$e(t) = \|x(t) - \hat{x}(t)\|,$$

де $\hat{x}(t)$ – відновлений вхідний вектор [6, с. 5750].

Дослідження AI-орієнтованих бездротових мереж показують, що несупервізовані методи є особливо корисними для раннього виявлення прихованих деградаційних процесів, які ще не призводять до явного порушення сервісів [7, с. 227].

Навчання з підкріпленням застосовується для задач активного управління ресурсами бездротової мережі, де агент взаємодіє з середовищем і формує політику керування. Формально задача описується як марковський процес прийняття рішень:

$$M = \langle S, A, P, R \rangle$$

де S – множина станів мережі;

A – множина можливих керуючих дій;

P – ймовірності переходів між станами;

R – функція винагороди, пов'язана з показниками надійності [3, с. 3615].

Метою є знаходження оптимальної політики π^* , що максимізує очікувану сумарну винагороду:

$$\pi^* = \underset{\pi}{\operatorname{argmax}} E \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r(t) \right],$$

де $r(t)$ формується на основі метрик надійності мережі, а γ – коефіцієнт дисконту [11, с. 7].

На відміну від існуючих підходів, у яких алгоритми штучного інтелекту застосовуються для оптимізації окремих параметрів мережі (затримки, пропускної здатності, втрат пакетів), у даній роботі надійність бездротової мережі розглядається як інтегральна цільова функція керування, що безпосередньо використовується у процесі прийняття рішень.

Концепція інтелектуалізованого управління бездротовою мережею ґрунтується на циклічній взаємодії процесів моніторингу, аналізу, прогнозування та керування. У загальному вигляді така схема може бути подана як замкнений контур управління:

$$X(t) \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow U \rightarrow X(t+1)$$

де $X(t)$ – вектор параметрів стану мережі;

A – блок аналітики та виявлення деградацій;

D – блок прогнозування та прийняття рішень;

U – блок керуючих впливів.

На відміну від традиційних схем управління, запропонована концепція передбачає використання алгоритмів штучного інтелекту на етапах аналізу та прийняття рішень, що дозволяє враховувати складні нелінійні залежності між параметрами мережі та переходити від реактивного до проактивного управління.

У рамках концепції алгоритми штучного інтелекту інтегруються з ключовими компонентами мережевої архітектури, зокрема з підсистемами збору телеметрії, управління ресурсами та сервісним рівнем. Формально взаємодію між мережевими компонентами та ШІ-моделями можна подати як відображення:

$$M: X(t) \rightarrow u(t)$$

де M – модель ШІ,

$u(t)$ – вектор керуючих дій [9, с. 279].

Алгоритми супервізованого та несупервізованого навчання виконують функції оцінювання та виявлення аномалій, тоді як алгоритми навчання з підкріпленням формують політики управління з урахуванням довгострокового впливу рішень на стан мережі. Важливою особливістю є узгодження роботи ШІ-модулів з багаторівневою архітекту-

рою мережі, що запобігає конфліктам між локальними та глобальними керуючими рішеннями.

Застосування інтелектуалізованого управління дозволяє формалізувати очікуваний ефект у вигляді зміни інтегрального показника надійності. Якщо R_0 – надійність мережі за традиційного управління, а R_{AI} – надійність за використання ШІ, то очікуваний вигравш може бути описаний як:

$$\Delta R = R_{AI} - R_0.$$

За рахунок проактивного прогнозування деградацій та адаптивного управління ресурсами очікується зменшення ймовірності перевищення критичних порогів затримки та втрат пакетів:

$$P\{D > D_{max}\}_{AI} < P\{D > D_{max}\}_0,$$

$$P\{Ploss > P_{max}\}_{AI} < P\{Ploss > P_{max}\}_0.$$

Інтелектуалізоване управління забезпечує не лише локальну оптимізацію параметрів, а системне підвищення надійності бездротової мережі в умовах динамічного та гетерогенного середовища. Запропонована концепція створює методологічне підґрунтя для подальших експериментальних досліджень та практичної реалізації ШІ-орієнтованих механізмів управління в бездротових мережах нового покоління.

Для реалізації проактивного підходу до забезпечення надійності бездротових мереж доцільним є перехід від традиційних реактивних механізмів управління до інтелектуалізованих контурів керування, що ґрунтуються на аналізі поточного стану мережі, прогнозуванні її поведінки та формуванні адаптивних керуючих впливів. У цьому контексті штучний інтелект розглядається як інтегрований елемент системи управління, здатний забезпечити узгоджену взаємодію між процесами моніторингу, прийняття рішень і керування ресурсами. Узагальнену структуру такого інтелектуалізованого контуру управління надійністю бездротової мережі наведено на рис. 1.

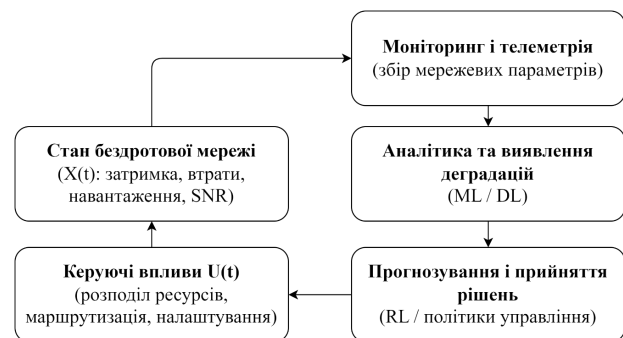


Рис. 1. Концептуальна схема інтелектуалізованого управління надійністю бездротової мережі з використанням алгоритмів штучного інтелекту

На схемі представлено замкнений контур інтелектуалізованого управління бездротовою мережею, у якому вихідною інформацією є вектор поточного стану мережі $X(t)$, що формується на основі показників затримки, втрат пакетів, навантаження та параметрів радіоканалу. Підсистема моніторингу та телеметрії забезпечує безперервний збір мережевих параметрів і передає їх до аналітичного модуля.

Для реалізації проактивного підходу до забезпечення надійності бездротових мереж у роботі запропоновано перехід від традиційних реактивних механізмів управління до інтелектуалізованих контурів керування, що ґрунтуються не лише на аналізі поточного стану мережі, а й на прогнозуванні її подальшої поведінки. На відміну від реактивних схем, у яких керуючі дії формуються після фіксації погіршення показників якості обслуговування, запропонований підхід орієнтований на випереджувальне виявлення деградаційних процесів ще до перевищення критичних порогів.

Оригінальність запропонованого підходу полягає у формалізації надійності бездротової мережі як об'єкта інтелектуального управління з власною динамікою та часовими масштабами, що дозволяє розглядати задачу керування у вигляді замкненого контуру «моніторинг – аналіз – прогнозування – керування». У межах цього контуру прогноз майбутнього стану мережі використовується не як допоміжна інформація, а як ключовий елемент формування керуючих рішень.

Запропонований контур управління відрізняється від відомих підходів тим, що інтегрує різні класи алгоритмів штучного інтелекту відповідно до їх функціональної ролі: алгоритми аналізу та виявлення деградацій формують оцінку поточного стану мережі, прогнозні моделі забезпечують оцінку ймовірності погіршення показників надійності, а алгоритми прийняття рішень формують керуючі впливи з урахуванням довгострокового ефекту їх застосування. Така інтеграція дозволяє перейти від локальної оптимізації окремих параметрів до системного управління надійністю мережі в умовах високої динаміки.

Аналітичний модуль, реалізований у складі ШІ-агентів спостереження та діагностики на основі алгоритмів машинного та глибинного навчання, здійснює оцінювання поточного стану мережі та виявлення деградаційних процесів. Результати аналізу передаються агенту керування, у якому формуються керуючі стратегії з використанням алгоритмів навчання з підкріпленням.

Розглянемо фрагмент бездротової мережі доступу, характерний для міського

сценарію 5G/6G, у якому одночасно обслуговуються мобільні користувачі та сервіси реального часу. Стан мережі в момент часу t описується вектором параметрів:

$$X(t) = \{D(t), J(t), P_{loss}(t), L(t)\}$$

де

- $D(t)$ – середня затримка пакетів (мс),
- $J(t)$ – варіація затримки (*jitter*, мс),
- $P_{loss}(t)$ – імовірність втрати пакетів,
- $L(t)$ – відносне навантаження мережі.

Для сервісів реального часу (відеопотік, V2X, керування) критичними вважаються порогові значення: $D \leq 50$ мс, $J \leq 10$ мс, $P_{loss} \leq 10^{-2}$.

Для формалізації інтегрального показника надійності надійність бездротової мережі визначимо як зважену інтегральну характеристику:

$$R(t) = w_D \cdot r_D(t) + w_J \cdot r_J(t) + w_P \cdot r_P(t)$$

де $w_D + w_J + w_P = 1$,

а нормалізовані складові задаються як:

$$r_D(t) = \exp\left(-\frac{D(t)}{D_{max}}\right), r_J(t) = \exp\left(-\frac{J(t)}{J_{max}}\right), r_P(t) = \exp\left(-\frac{P_{loss}(t)}{P_{max}}\right).$$

Для сервісів реального часу прийемо: $w_D = 0.4$, $w_J = 0.3$, $w_P = 0.3$.

Для перевірки запропонованих рішень проведене імітаційне моделювання роботи бездротової мережі з використанням середовища NS-3 (v3.38) у поєднанні з Python-модулем для інтеграції ШІ-агентів (TensorFlow 2.13).

Моделювання виконувалося у двох конфігураціях:

- сценарій А – традиційна реактивна схема управління ресурсами;
- сценарій В – запропонована схема з інтелектуальними агентами.

Тривалість кожного прогону моделі – 1800 секунд, кількість незалежних запусків – 20.

Моделювана мережа відповідала гетерогенній 5G-архітектурі з такими параметрами:

- Кількість базових станцій – 7 (1 macro + 6 small cells);
- радіус macro – 500 м;
- радіус small cell – 100 м;
- кількість мобільних вузлів – 120;
- тип мобільності – Random Waypoint (1–12 м/с);
- середнє навантаження – 65–85 %.

Інтелектуальний контур складався з:

- модуля виявлення деградації (3 повнозв'язні шари (128–64–32), Активація: ReLU, вихід: ймовірність деградації, оптимізатор: Adam, розмір навчальної вибірки: 50.000 зразків (формувався шляхом багаторазового імітаційного моделювання

мережі з варіюванням навантаження (50-90 %), швидкості мобільності (1-15 м/с) та рівня інтерференції), точність на валідації: 92,4 %)

– RL-агент, що відповідає за зміна ширини каналу, перерозподіл потужності, ініціацію handover (стан: SNR, Packet loss, Delay, Queue length).

Сценарій А – традиційне реактивне управління, де у традиційній схемі керування рішення приймаються після фактичного погіршення параметрів. Затримка реакції системи становить $\Delta t_r = 1-2$ с.

Для пікового навантаження $L \approx 0.9$ типовими значеннями параметрів є наступні:

- $D = 65$ мс;
- $J = 18$ мс;
- $P_{loss} = 2.5 \cdot 10^{-2}$.

Сценарій В – інтелектуалізоване управління з прогнозуванням, де інтелектуальний контур керування включає прогноз стану мережі і завдяки проактивному перерозподілу ресурсів та маршрутизації отримуємо:

- $D = 42$ мс;
- $J = 8$ мс;
- $P_{loss} = 7 \cdot 10^{-3}$.

Середній виграш становив:

$$\Delta R = RB - RA = 0.072 = 7.2\%.$$

На відміну від реактивних процедур, агенти працювали з коротким горизонтом прогнозу 1-3 с та намагалися попередити порушення порогів D_{max} , J_{max} , $P_{loss,max}$ до моменту їх фактичного перевищення.

Навчання виконувалося у змішаному режимі. Для прогнозування деградації використовувалась супервізована модель (послідовні дані телеметрії з вікном 60 с, крок 1 с) з ціллю зменшити ризик порушення QoS у наступні 2 с. Для керування ресурсами застосовано навчання з підкріпленням, де станом був вектор агрегованих показників соти/сектора, дією – набір дискретних керуючих впливів, а винагородою – зважене зростання інтегральної надійності $R(t)$ зі штрафом за різкі зміни конфігурації. У результаті агенти зменшили середній час прийняття рішення з 1.2 с (реактивний цикл NMS/SON) до 0.35 с за рахунок локальної обробки на edge-вузлі, а також скоротили час перебування мережі в деградованому стані під час пікових навантажень.

Ефект оцінювався на типових сценаріях “вечірній пік” і “висока мобільність” (інтенсивні handover) у міському середовищі. Порівняння з базовим реактивним керуванням показало, що

застосування ШІ-агентів дає практично значущий виграш за метриками сервісної надійності: знижується частка інтервалів із перевищенням порогів затримки та втрат, а інтегральний показник надійності зростає на рівні 0.15-0.22 (абсолютно) залежно від сценарію (табл.1). Це узгоджується з логікою проактивного керування: агенти зменшують запізнення реакції та підвищують точність локалізації причин деградації (перевантаження PRB, інтерференція, невдалий handover), що в підсумку стабілізує QoS.

Таблиця 1

Порівняння базового керування та підходу з ШІ-агентами

Показник	Базове реактивне керування	ШІ-агенти	Зміна
Середній час реакції на деградацію, с	1.20	0.35	-71%
Частка інтервалів $D > 50$, мс	12.8%	7.4%	-42%
Частка інтервалів $P_{loss} > 10^{-2}$	6.1%	3.7%	-39%
Середній інтегральний показник R	0.46	0.63	+0.17
Тривалість деградованих станів (середнє), с	18.5	11.2	-39%

Сформовані керуючі впливи $U(t)$ застосовуються до мережевих компонентів і реалізуються у вигляді дій з розподілу ресурсів, маршрутизації трафіку та налаштування параметрів передачі. У результаті змінюється стан мережі $X(t+1)$, що замикає контур управління та забезпечує адаптацію мережі до динамічних умов функціонування з метою підвищення її надійності.

На відміну від традиційних методів підвищення надійності, які ґрунтуються на резервуванні або локальній оптимізації параметрів, інтелектуалізований підхід орієнтований на проактивне реагування на потенційні деградації. Це узгоджується з результатами сучасних досліджень, у яких підкреслюється обмежена ефективність реактивних механізмів управління в умовах високої динаміки та гетерогенності мереж нового покоління. Використання прогнозних моделей дозволяє зменшити часовий розрив між виникненням деградаційних процесів і застосуванням керуючих впливів.

Особливу увагу слід приділити інтеграції різних класів алгоритмів штучного інтелекту в межах однієї архітектури управління. Як показано в роботі, супервізовані методи, несупервізовані підходи та алгоритми навчання з підкріпленням

ням виконують взаємодоповнювальні функції: від оцінювання та виявлення аномалій до формування керуючих політик. Така інтеграція відповідає сучасним тенденціям розвитку мереж 6G, де штучний інтелект розглядається як невід’ємна складова архітектури мережі, а не як зовнішній інструмент оптимізації.

Водночас запропонована концепція не позбавлена обмежень. Ефективність інтелектуалізованого управління суттєво залежить від якості та повноти даних, що надходять із підсистеми моніторингу. У реальних мережах можливі затримки збору телеметрії, втрати даних або шумові спотворення, що можуть негативно впливати на точність моделей штучного інтелекту. Крім того, застосування алгоритмів навчання з підкріпленням потребує обережного проєктування функцій винагороди, оскільки некоректна формалізація цілей може призводити до локально оптимальних, але глобально нестабільних рішень [11, с. 9].

З практичної точки зору важливим аспектом є обчислювальна складність інтелектуальних алгоритмів і можливість їх розміщення в різних сегментах мережі – від периферійних вузлів до централізованих хмарних компонентів. Це визначає подальші напрями досліджень, пов’язані з розподіленою реалізацією ШІ-модулів і балансуванням між затримками, точністю прийняття рішень та споживанням ресурсів.

Запропонована концепція створює методологічне підґрунтя для подальших експериментальних досліджень та практичної реалізації ШІ-орієнтованих систем управління в реальних мережесередовищах.

Висновки. У межах проведеного аналітичного моделювання надійності бездротової мережі показано, що традиційні реактивні підходи до управління ресурсами, засновані на резервуванні та постфактум-корекції параметрів, призводять до зниження інтегрального показника надійності в умовах високого навантаження та динамічної зміни стану мережі.

Зокрема, порівняльний аналіз двох сценаріїв управління (традиційного реактивного та інтелектуалізованого з прогнозуванням) засвідчив, що за однакових умов навантаження інтегральний показник надійності у випадку реактивного управління є суттєво нижчим, ніж при використанні інтелектуального контуру керування. Це

зумовлено часовим запізненням реакції системи управління та неможливістю попередження деградаційних процесів до перевищення критичних порогів якості обслуговування.

У роботі вперше запропоновано розглядати надійність бездротової мережі як інтегральну керовану характеристику, що безпосередньо включається до цільових функцій інтелектуального управління. встановлено, що алгоритми штучного інтелекту розглядаються як перспективний інструмент підвищення ефективності управління бездротовими мережами, однак більшість існуючих рішень має фрагментарний характер і не формує цілісного підходу до забезпечення надійності як системної властивості мережі. Це обґрунтовує необхідність переходу до інтелектуалізованих механізмів управління, інтегрованих безпосередньо в архітектуру мережі.

У роботі надійність бездротової мережі формалізовано як багатовимірний об’єкт інтелектуального управління, що описується сукупністю метрик якості обслуговування, їх динамікою та імовірнісними характеристиками деградації. Запропоновано концептуальну схему інтелектуалізованого управління, яка реалізує замкнений контур «моніторинг – аналіз – прогнозування – керування».

У межах запропонованої в роботі моделі надійності бездротової мережі як об’єкта інтелектуального управління обґрунтовано функціональне розмежування класів алгоритмів штучного інтелекту відповідно до етапів замкненого контуру керування. Зокрема, на основі аналізу структури інтегрального показника надійності та часової динаміки мережесередовища встановлено, що супервізовані методи є найбільш придатними для задач прогнозування деградації параметрів, несупервізовані – для виявлення аномальних станів у режимі неповної інформації, тоді як алгоритми навчання з підкріпленням забезпечують формування адаптивних керуючих політик з урахуванням довгострокового впливу рішень на інтегральний показник надійності.

Запропоноване автором узгодження класів алгоритмів штучного інтелекту з етапами управління дозволяє перейти від локальної оптимізації окремих параметрів мережі до системного підвищення її надійності в динамічних умовах функціонування.

Список літератури:

1. Zhang C., Patras P., Haddadi H. Deep learning in mobile and wireless networking: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, No. 3. P. 2224-2287. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2904897>

2. Alhammadi A., Shaye A., El-Saleh A.A., Azmi M.H., Ismail Z.H., Kouhalvandi L., Saad S.A. Artificial Intelligence in 6G wireless networks: Opportunities, applications, and challenges. *International Journal of Intelligent Systems*. 2024. 27 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/8845070>
3. Alhashimi H.F., Hindia M.N., Dimyati K., Hanafi E.B., Alden F.Z. Survey on AI-enabled resource management for 6G heterogeneous networks: Recent research, challenges, and future trends. *Computers, Materials & Continua*. 2025. Vol. 83, No. 3. P. 3585-3622. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.062867>
4. Lutepo A., Zhang K. A Review of Artificial Intelligence Applications in contemporary computer network technologies. *Communications and Network*. 2024. Vol. 16. P. 90-107. DOI: <https://doi.org/10.4236/cn.2024.163005>
5. Rahmayanti D. Predicting quality of service on cellular networks using artificial intelligence. *Journal of Electrical Engineering and Informatics*. 2023. Vol. 5, No. 2. P. 134-145. DOI: <https://doi.org/10.55606/jeei.v5i2.3901>
6. Ismail L., Buyya R. Artificial Intelligence applications and self-learning 6G networks for smart cities digital ecosystems: Taxonomy, challenges, and future directions. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 15. P. 5750. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22155750>
7. Nancharaiah B., Ravi K.C., Srivastava A.K. Analysis of data science and AI-enabled 6G wireless communication networks. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2023. Vol. 66. P. 223-232. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0735272723050059>
8. Sheikh B. AI-Enabled Wireless Communication in 6G. A Review of Current Trends and Developments. 2023 *2nd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Control and Telecommunication Engineering (ETECTE)*. P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ETECTE59617.2023.10396710>
9. Yang H., Alphones A., Xiong Z., Niyato D., Zhao J., Wu K. Artificial-Intelligence-enabled intelligent 6G networks. *IEEE Network*. 2020. Vol. 34, No. 6. P. 272-280. DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000195>
10. Wang Y., Matta I. Multi-layer virtual transport network management. *Computer Communications*. 2018. Vol. 130. P. 38-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.08.011>
11. Challita U., Ryden H.A., Tullberg H. When machine learning meets wireless cellular networks: Deployment, challenges, and applications. 2019. P. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.03585>

Kalmykov O.S. APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS TO IMPROVE THE RELIABILITY OF WIRELESS NETWORKS

The article deals with the problem of ensuring the reliability of next-generation wireless networks in the context of the growing complexity of their architecture, heterogeneity and dynamic nature of their operation parameters. It is shown that traditional approaches to improving reliability, based on redundancy and reactive resource management, are not effective enough for modern 5G/6G networks, especially in scenarios with stringent requirements for latency and connection stability.

The article substantiates the expediency of using artificial intelligence algorithms as a tool for increasing the adaptability and stability of wireless networks based on the analysis of modern scientific research. The network reliability is formalized as a multidimensional object of intelligent management, which is described by a set of service quality indicators, their temporal dynamics and probabilistic characteristics of degradation.

The concept of intelligent wireless network management is proposed, which implements a closed loop "monitoring - analysis - forecasting - control" using machine learning, deep learning, and reinforcement learning algorithms. It is shown that the integration of different classes of artificial intelligence algorithms allows us to move from local optimization of individual parameters to systematic improvement of network reliability under dynamic operating conditions.

The results obtained form the methodological basis for further experimental research and practical implementation of AI-oriented mechanisms for managing next-generation wireless networks.

Keywords: artificial intelligence, intelligent management, machine learning, network reliability, quality of service, wireless networks.

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Капличний О.С.

<https://orcid.org/0009-0001-7464-4517>

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ НВЧ КОМУТАТОРА З КОМПЕНСАЦІЄЮ ВІД'ЄМНОГО АКТИВНОГО ОПОРУ

У роботі досліджено надвисокочастотні (НВЧ) комутатори та ключові елементи на основі транзисторних схем з від'ємним диференціальним опором із використанням С-негатронів N-типу. Актуальність зумовлена потребою створення широкосмугових, малогабаритних і енергоефективних комутаційних пристроїв із малими втратами та високою ізоляцією для телекомунікаційних і радіотехнічних систем.

Проаналізовано обмеження традиційних НВЧ комутаторів на феритах, р-і-n діодах і транзисторах, зокрема значні втрати або вузьку смугу частот. Показано, що використання елементів з від'ємними диференціальними параметрами дає змогу компенсувати активні втрати, формувати малі значення вносимого затухання у відкритому режимі та забезпечувати значну ізоляцію в закритому стані.

Розглянуто схеми з послідовним і паралельним включенням С-негатрона N-типу. Побудовано еквівалентні моделі та отримано аналітичні вирази для коефіцієнта передачі з урахуванням від'ємної диференційної ємності та активного опору. Досліджено частотні характеристики в діапазоні 100 – 1000 МГц.

Для послідовної схеми встановлено невелике затухання у відкритому режимі та значне затухання у закритому режимі. Запропоновано компенсацію від'ємного активного опору шляхом введення додатного опору, що забезпечує широкосмуговість і стабільні вихідні характеристики. Для паралельної схеми показано можливість отримання підсилення у відкритому режимі та визначено умови стійкості за критерієм Рауса – Гурвіца.

Результати роботи підтверджують доцільність використання транзисторних схем з від'ємним диференціальним опором для побудови широкосмугових НВЧ комутаторів із керованими характеристиками, малими втратами, можливістю підсилення та інтегральної реалізації. Отримані аналітичні залежності можуть бути використані при синтезі активних комутаційних і фільтруючих пристроїв у системах телекомунікацій та радіотехніки.

Ключові слова: НВЧ комутатор, від'ємний диференціальний опір, широкосмуговий ключ, активний опір, транзисторні схеми, негатроніка.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток телекомунікаційних систем із імпульсним представленням інформації та використанням фазо-логічних і нейронних елементів зумовлює потребу у створенні радіотехнічних пристроїв з керованими, нелінійними та адаптивними характеристиками. У таких структурах особливого значення набувають НВЧ комутаційні вузли, здатні працювати в умовах високочастотної обробки імпульсних сигналів із мінімальними втратами та забезпеченням стійкості. Існуючі комутатори не повною мірою відповідають вимогам інтеграції з фазо-логічними та нейронними схемами через обмежену широкосмуговість і складність керування параметрами. Тому актуальною є розробка активних НВЧ пристроїв на основі елементів з від'ємними диференціальними параметрами, які можуть бути використані

як функціональні вузли в радіотехнічних і телекомунікаційних системах із імпульсним представленням інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях радіотехнічних пристроїв із імпульсним представленням інформації значна увага приділяється фазо-логічним і нейронним елементам, здатним реалізовувати нелінійну обробку сигналів у НВЧ діапазоні. Відомі роботи з негатроніки та елементів з від'ємними диференціальними параметрами демонструють можливість формування активних вузлів із керованими амплітудно-частотними характеристиками, що є релевантним для побудови імпульсних логічних структур. Окремі дослідження присвячені НВЧ ключам і комутаторам на транзисторній основі, однак вони переважно не орієнтовані на інтеграцію з фазо-логіч-

ними та нейронними схемами. Невирішеними залишаються питання широкосмуговості, стійкості та узгодження параметрів активних НВЧ елементів із вимогами імпульсних телекомунікаційних систем нового покоління.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення, теоретичне обґрунтування та дослідження НВЧ комутаторів і ключових елементів на основі транзисторних схем з від'ємним диференціальним опором, зокрема із застосуванням С-негатронів N-типу, з метою отримання широкосмугових характеристик, високої ізоляції у режимі «закрито» та малих втрат або підсилення у режимі «відкрито».

Виклад основного матеріалу. У високо-частотних системах комутації сигналів перевагу мають ключі з малими втратами в режимі «відкрито» та високим затуханням у режимі «закрито». Застосування транзисторних схем із від'ємним диференціальним опором (ВДО) – зокрема С-негатронів N-типу – дозволяє створювати НВЧ-комутатори з нульовими втратами у відкритому стані та додатковим підсиленням сигналу. [1-2] Відомо, що ключі на НВЧ-транзисторах у резонансному режимі забезпечують найкращі параметри відкриття/закриття. [3] Використання С-негатронів N-типу імітує ці переваги: ключі мають малі втрати, компактні габарити, низьку потужність керування та можливість інтеграції, а їх принциповою перевагою є широкосмуговість. Така властивість критична для імпульсних систем, оскільки забезпечує мінімальне спотворення коротких сигналів.

Для переходу до імпульсно-фазових логічних та нейронних структур необхідні ключі з широким частотним діапазоном, керованістю від керуючого імпульсу та високою швидкодією. У цьому контексті досліджено комутатори на основі каскадних схем з С-негатронами, які забезпечують електричне керування переключенням сигналу з послідовним або паралельним включенням ВДО-елемента. [3] У огляді розглянуто принцип побудови та аналіз характеристик таких ключів, наведено приклади схем і графіків, а також продемонстровано результати моделювання конкретних НВЧ-комутаторів. Особливу увагу приділено зв'язку отриманих результатів із застосуванням у імпульсних фазі-логічних та нейронних структурах – зокрема вимогам керованості, широкосмуговості, стійкості і топологічної придатності. [5]

Основний елемент комутатора – аналоговий ключ. У розглянутій схемі ключ реалізовано на

основі послідовного включення транзисторної структури з кулон-вольтовою характеристикою N-типу С-негатрона. [6] При цьому в одному режимі ключ забезпечує малі втрати у тракці сигналу, а в іншому – велике затухання.

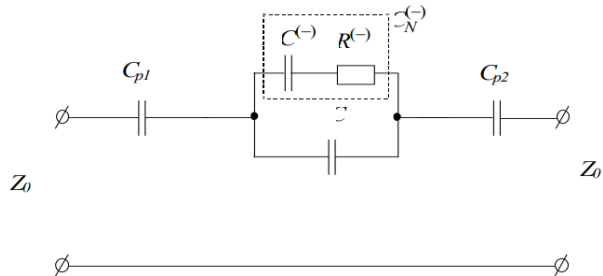


Рис. 1. Еквівалентна схема ключа на С-негатроні N-типу з урахуванням еквівалентної схеми С-негатрона N-типу в режимі «закрито»: $C^{(-)}$ – від'ємний диференціальний опір С-негатрона, $R^{(-)}$ – від'ємний активний опір С-негатрона, Z_0 – характеристичний опір лінії, C_{p1}, C_{p2} – розділові ємності

На рис.1 наведено еквівалентну схему такого ключа. В неї входить ВДО-елемент (С-негатрон) із від'ємною диференційною ємністю ($-C$) та активним опором ($-R$), а також розділові ємності та характеристичний опір лінії.

У режимі «відкрито» робоча точка С-негатрона лежить на спадній ділянці його кулон-вольтової характеристики, де $\Delta C > 0$. Звідси повний комплексний опір керуючого елемента в закритому режимі наведений на рис. 2.

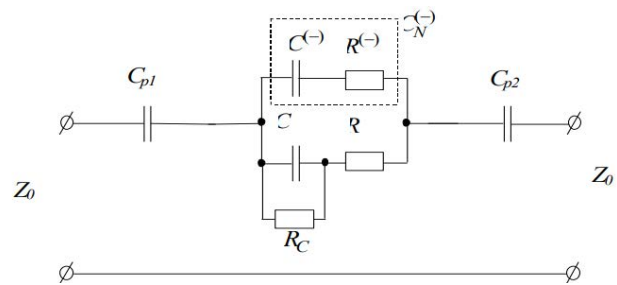


Рис. 2. Еквівалентна схема ключа на С-негатроні N-типу в режимі «закрито» з компенсуючим опором R : $C^{(-)}$ – від'ємний диференціальний опір С-негатрона, $R^{(-)}$ – від'ємний активний опір С-негатрона, Z_0 – характеристичний опір лінії, C_{p1}, C_{p2} – розділові ємності, R_C – активний опір втрат конденсатора з ємністю C

Підстановка цього опору у вираз для затухання дає аналітичну залежність $L(f)$ у відкритому режимі формула (1). При «закритому» режимі, навпаки, $\Delta C < 0$ і опір стає індуктивним. [7]

$$L_{\text{вд}} = 10 \lg \left(\frac{1 + \omega^2 (C^2 R^2 + 4C^2 R Z_0 + 4((C + C_{d1})^2 + C^2 C_{d1}^2 R^2 \omega^2) Z_0^2)}{4\omega^2 ((C + C_{d1})^2 + C^2 C_{d1}^2 R^2 \omega^2) Z_0^2} \right) \quad (1)$$

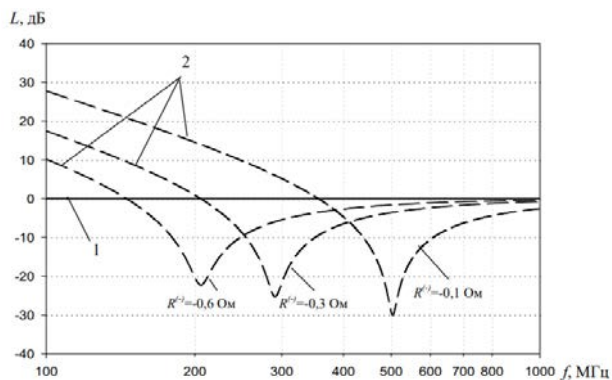


Рис. 3. Частотна залежність затухання L , утвореного ключем в режимі «відкрито» (1) і «закрито» (2) для трьох значень від'ємного активного опору $R^{(-)}$

На рис. 3 показані приклади частотних характеристик затухання $L(f)$ в обох режимах ключа для різних значень параметрів від'ємного диференційного опору. Тут крива 1 відповідає режиму «відкрито», крива 2 – «закрито» (вираженої активним затуханням $R^{(-)}$). Згідно з рис.3, при «відкрито» затухання майже не залежить від частоти у розглянутому діапазоні, тоді як при «закрито» $L(f)$ відрізняється значним затуханням, котре залежить від величини від'ємного R . Наприклад, при збільшенні $|R|$ з $0,1 \Omega$ до $0,6 \Omega$ межа затухання зростає. [7] Таким чином, ключ у закритому стані фактично є «резонансним поглиначем», а в відкритому – майже прозорим.

Крім того, через наявність від'ємного опору ключ може надавати підсилення. Аналітичний розрахунок показує, що за певних умов від'ємного опору і ємності ключ починає працювати з коефіцієнтом підсилення ($L < 0$) у відкритому стані. Це підтверджено моделлю (рис.4): при зменшенні абсолютної величини $|R|$ (наприклад, від -100Ω до -30Ω) затухання у відкритому режимі зростає, тобто зменшується від'ємне

значення L , що еквівалентно збільшенню підсилення ключа – з $\approx -2,5$ дБ до $-15,5$ дБ.

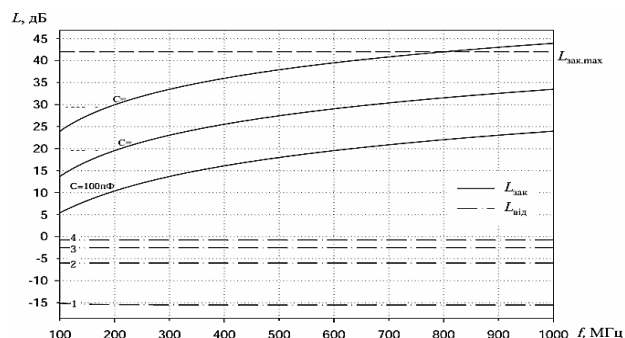


Рис. 4. Частотна залежність затухання L , утвореного ключем в режимі «закрито» $L_{зак}$ і «відкрито» $L_{від}$: 1 – (–) $R = -30 \Omega$, 2 – (–) $R = -50 \Omega$, 3 – (–) $R = -100 \Omega$, 4 – (–) $R = -300 \Omega$

Отже, послідовно увімкнений С-негатрон може слугувати імпульсним підсилювачем або ключем, що є важливим для нейроморфних схем.

Альтернативна топологія – ключ із паралельним включенням керуючого елементу з ВДО у тракт сигналу. На рис. 5 наведено еквівалентні схеми такого ключа: (а) – у режимі «відкрито», (б) – «закрито».

У цій схемі активний елемент з від'ємним диференційним опором підключено паралельно лінії передачі. При «відкрито» точка нульової напруги зміщення лежить на падаючій ділянці кулон-вольтової характеристики, тому $\Delta C < 0$, а при «закрито» – навпаки.

Графіки частотної залежності затухання $L(f)$ для цього ключа наведені на рис.4. Кожен графік відповідає різним значенням ΔC через зміну напруги зміщення. З аналізу видно, що зростання ΔC , тобто підсилення об'ємної ємності, збільшує максимальне затухання у «закритому» стані, наприклад, при ΔC від 300 пФ до 1000 пФ $L_{\max}$

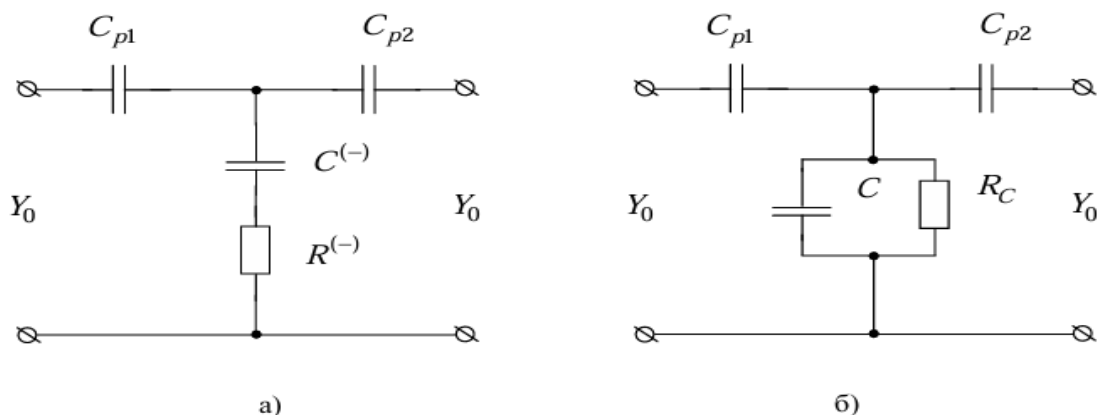


Рис. 5. Еквівалентна схема ключа з паралельним включенням С-негатрона N-типу в режимі «відкрито» (а) та «закрито» (б)

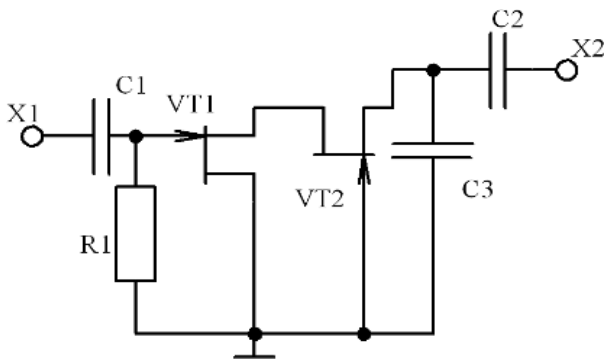


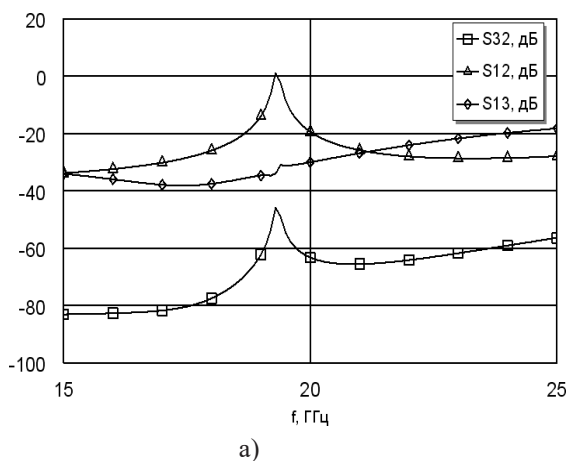
Рис. 6. Схема (кола живлення не показані) невазємного однорезонаторного НВЧ комутатора

зростає з 26.5 дБ до 37 дБ на частоті 450 МГц. Водночас, від'ємна активна провідність при відкритому режимі забезпечує підсилення: за формулою (2) видно, що за умови певного співвідношення параметрів $0 < L$ відкрито, тобто досягається підсилення сигналу. [9]

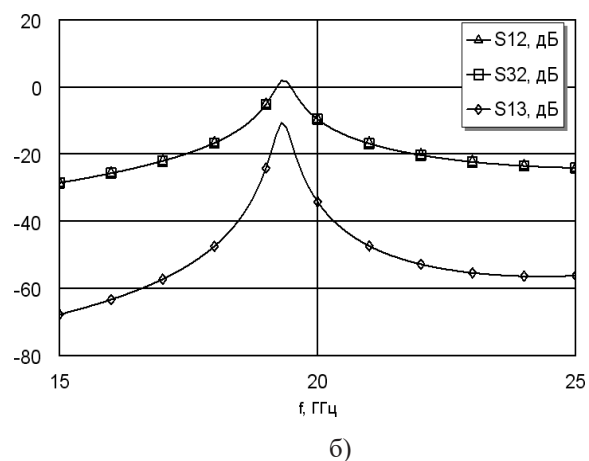
$$L_{\text{від}} = 10 \lg \left(\frac{\left(4Y_0^2 + C^{(-)} (\omega + 2R_0^{(-)} \omega Y_0)^2 \right)}{4 \left(1 + C^{(-)2} R^{(-)2} \omega^2 \right) Y_0^2} \right) \quad (2)$$

Ключ із паралельним ВДО має схожі властивості управління сигналом, але відрізняється своєю топологією й дозволяє отримати додаткові режими як от імпульсний атенуатор з керованим затуханням. При цьому для збереження стабільності слід підбирати додаткові резистивні компоненти або компенсуючий опір, щоб уникнути неконтрольованого самозбудження.

Для практичної перевірки запропонованих ідей побудовано та змодельовано конкретні НВЧ-комутатори.



а)



б)

Рис. 7. Коефіцієнт передачі по напрузі

Як приклад, на рис.6 показано однорезонаторну невазємну активну НВЧ-схему (двоканальний комутатор), де використовуються транзистори та паразитні ємності як елементи з ВДО, а також резонансний контур на виході яка складається з індуктивності на основі ПШТ та резонуючої ємності C3, що утворює паралельний коливальний контур, включений паралельно вихідному колу, що забезпечує частотну вибірковість сигналу. [10]

Вхідний сигнал, через розділові конденсатори C1 і C2 подається між затвором і витоком ПТШ, що забезпечує невазємні властивості фільтра.

Результати моделювання схеми невазємного однорезонаторного НВЧ комутатора свідчать, що вона забезпечує підсилення ~ 3 дБ на частоті 17.1 ГГц у смузі пропускання. За межами смуги передбачено загасання понад 20 дБ і розв'язку каналів ≈ 10 дБ. Ці характеристики свідчать про високу селективність і достатню ізоляцію комутатора, що важливо для імпульсної передачі даних, якщо врахувати, що швидкі імпульси мають широкий спектр і потребують узгоджених фільтрів для запобігання спотворень. [11]

Коефіцієнт передачі напруги показаний на рис.7, а блокова схема двоканального комутатора – на рис.8.

Висновки. У результаті досліджень встановлено, що транзисторні структури з від'ємними диференційними параметрами можуть бути використані як функціональна основа радіотехнічних пристроїв із імпульсним представленням інформації, зокрема у фазо-логічних та нейронних НВЧ схемах. Для послідовного включення С-негатрона N-типу підтверджено можливість отримання дуже малого затухання у режимі передачі та значної ізоляції у режимі блокування, а введення компенсуючого додатного опору забезпечує широкосмуговість і стабільність характеристик. Для пара-



Рис. 8. Блок схема НВЧ – комутатора на два канали

лельної схеми показано можливість формування підсилення у відкритому стані та визначено умови стійкості за критерієм Рауса–Гурвіца. Отримано затухання у вимкненому стані до 42 дБ і незначне підсилення у ввімкненому стані при інтегральній реалізації з площею кристала 2 мм². Результати підтверджують придатність таких активних НВЧ елементів для використання у телекомунікаційних системах із фазологічною та нейронною обробкою імпульсних сигналів.

Список літератури:

1. Філінюк М.А., Кравцов Ю.І. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький, 2002. №1.
2. Філінюк М.А. Вісник ВПІ. Вінниця, 2002. №6.
3. Aghaei, Maryam & Bogaerts, Annemie. (2015). Particle transport through an inductively coupled plasma torch: Elemental droplet evaporation. J. Anal. At. Spectrom. DOI: 31. 10.1039/C5JA00162E.
4. L. Siqing, L. Canfeng, and L. Qiwei, "Magnetic-field concentration in inductively coupled plasma reactors," 2006, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a1/f5/bc/2ec53087e0204a/WO2006044419A2.pdf>.
5. Yan, Keping & Heesch, E.J.M. & Pemen, A. & Huijbrechts, P. & Laan, Piet. (2001). A 10 kW high-voltage pulse generator for corona plasma generation. Review of Scientific Instruments. 72. 2443-2447. DOI: 10.1063/1.1367358.
6. Narayanaswamy, Venkateswaran & Raja, Laxminarayan & Clemens, Noel. (2010). Characterization of a High-Frequency Pulsed-Plasma Jet Actuator for Supersonic Flow Control. Aiaa Journal - AIAA J. 48. 297-305. 10.2514/1.41352.
7. Авторське свідоцтво SU 765900, H01H 33/66, 23.09.80
8. F. Volke and M. Benecke, "NMR imaging method and device focusing magnetic flux to a focal point in the imaging volume region," 2009, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/16/37/87/975495e3626e18/US7518361.pdf>.
9. J. K. Hastings, M. A. Judds, and M. S. G., "Magnetic flux concentrator anti-differential current sensing topology," 2007, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/82/d4/32/914581cbb0def7/US7157898.pdf>.
10. O. Yoshida, T. Maruyama, and K. Shirakubo, "Torque sensor and power steering system using the torque sensor," 2016, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/81/94/f5/c77bd565becc0c/US9302700.pdf>.
11. P. Augier, E. Coupart, A. Eydelie, P. Gauthier, C. G.-M. Guillo, and Tl. Jadeau, "Rotating electrical machine with concentration flux rotor and teeth-wound stator," 2001, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8b/b0/67/9d143afac2006e/EP1152516A2.pdf>.
12. Lugin, V & Koptiyakov, Alexander & Petrov, A & Zinovev, K & Kamaev, D. (2018). Power supplies for dual-frequency induction melting of metals. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 313. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/313/1/012008.
13. K. Tashiro, G.-ya Hattori, and H. Wakiwaka, "Magnetic flux concentration methods for magnetic energy harvesting module," in EPJ Web of Conferences, 2013, p. 4, DOI: 10.1051/epjconf/20134006011.
14. Prat-Camps, Jordi & Navau, Carles & Sanchez, Alvaro. (2013). Experimental realization of magnetic energy concentration and transmission at a distance by metamaterials. Applied Physics Letters. DOI: 105. 10.1063/1.4903867

Kaplychnyi O.S. RESEARCH OF A MICROWAVE SWITCH WITH NEGATIVE RESISTANCE COMPENSATION

The work investigates ultra-high-frequency (MHF) switches and key elements based on transistor circuits with negative differential resistance using N-type C-negatrons. The relevance is due to the need to create broadband, small-sized and energy-efficient switching devices with low losses and high isolation for telecommunication and radio engineering systems.

The limitations of traditional microwave switches based on ferrites, p-i-n diodes and transistors are analyzed, in particular significant losses or a narrow frequency band. It is shown that the use of elements with negative differential parameters makes it possible to compensate for active losses, form small values of insertion attenuation in the open mode and provide significant isolation in the closed state.

Circuits with serial and parallel inclusion of an N-type C-negatron are considered. Equivalent models were constructed and analytical expressions for the transfer coefficient were obtained taking into account negative differential capacitance and active resistance. Frequency characteristics were studied in the range of 100 – 1000 MHz.

For the serial circuit, a small attenuation in the “open” mode and a significant attenuation in the “closed” mode were established. Compensation of the negative active resistance was proposed by introducing a positive resistance, which ensures broadband and stability of the characteristics. For the parallel circuit, the possibility of obtaining amplification in the open mode was shown and the stability conditions were determined according to the Routh – Hurwitz criterion.

The results of the work confirm the feasibility of using transistor circuits with negative differential resistance for constructing broadband microwave switches with controllable characteristics, low losses, the possibility of amplification and integrated implementation. The obtained analytical dependencies can be used in the synthesis of active switching and filtering devices in telecommunications and radio engineering systems.

Keywords: *microwave switch, negative differential resistance, broadband switch, active resistance, transistor circuits, negatronics.*

Дата першого надходження статті до видання: 13.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Коновалов Д.Г.

<https://orcid.org/0009-0001-6301-4376>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Яковенко І.В.

<https://orcid.org/0009-0003-7705-4584>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАТРИМКО У РОЯХ ДРОНІВ

У статті розглянуто проблему забезпечення ефективної маршрутизації в роєвих бездротових MESH-мережах дронів в умовах високої мобільності та швидкої зміни топології. Показано, що традиційні проактивні протоколи, зокрема OLSR, орієнтуються виключно на поточний стан мережі та не враховують прогнозовану еволюцію взаємного розташування вузлів, що призводить до частих перепобудов маршрутів, зростання затримки та зниження рівня доставки пакетів.

Запропоновано прогнозно-орієнтовану модель маршрутизації, яка інтегрує геометричне прогнозування траєкторій руху дронів, стохастичну оцінку ймовірності збереження міжвузлових каналів і модель прогнозованої чергової затримки на основі М/М/1. Сформовано узагальнену часово-просторову метрику маршруту, що враховує майбутню конфігурацію топології та очікувану якість зв'язку. На відміну від класичних підходів, запропонований алгоритм мінімізує вагу маршруту з урахуванням прогнозованих змін, що дозволяє підвищити стійкість мережі до динамічних впливів і зменшити ймовірність розриву каналу.

Реалізацію моделі виконано у середовищі OMNeT++/INET з подальшим порівнянням із базовим протоколом OLSR. За результатами моделювання встановлено зменшення середньої затримки передачі пакетів на 10–13%, підвищення Packet Delivery Ratio на 7–9% та збільшення частки стабільних маршрутів приблизно на 20% при зростанні швидкості руху дронів. Додатково зафіксовано скорочення середньої довжини маршруту, що знижує навантаження на вузли та підвищує загальну ефективність мережі.

Запропонований підхід не потребує модифікації фізичного або каналного рівня та може бути інтегрований у наявні стек-архітектури маршрутизаторів як нова метрика вибору шляху. Отримані результати підтверджують доцільність використання прогнозно-орієнтованої маршрутизації для побудови високостабільних і низькозатримкових роєвих мереж дронів у сценаріях із підвищеною мобільністю.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, MESH-мережа, рій дронів, якість обслуговування, стохастична модель, маршрутизація, канал зв'язку, затримка, прогнозування руху.

Постановка проблеми. Сучасні бездротові MESH-мережі на основі роєвих груп дронів активно застосовуються у задачах моніторингу, картографування, розвідки та аварійного реагування. Їх ключовою особливістю є висока мобільність вузлів і динамічна зміна топології, що ускладнює підтримання стабільних маршрутів із малою затримкою. Класичні протоколи, зокрема OLSR, орієнтуються лише на поточний стан мережі та не враховують прогнозовані зміни положення дронів і якості каналів, що призво-

дить до зростання затримок, частих перепобудов маршрутів і зниження рівня доставки даних.

За умов високої мобільності важливо не лише реагувати на зміни зв'язків, а й передбачати майбутню структуру мережі. Тому активно розвивається напрям прогнозно-орієнтованої маршрутизації, який враховує часово-просторову еволюцію топології. Водночас більшість підходів зосереджується окремо на прогнозуванні руху або оцінці надійності каналів, тоді як комплексне поєднання прогнозу траєкторій, ста-

більшості каналу та очікуваної затримки в єдиній метриці маршруту залишається недостатньо дослідженим.

Отже, актуальною є розробка маршрутизатора, що враховує як поточні, так і прогнозовані параметри мережі. Це дасть змогу формувати стійкі до змін топології маршрути, зменшувати затримку та підвищувати QoS у роєвих мережах дронів, особливо за умов інтенсивного трафіку та жорстких вимог до часу реакції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика маршрутизації в роєвих бездротових мережах UAV активно досліджується в європейській та українській наукових школах у зв'язку зі зростанням вимог до мобільності, адаптивності й стійкості комунікацій. Більшість робіт зосереджена на забезпеченні якості зв'язку в MANET-і MESH-мережах за умов швидкого переміщення вузлів. У працях Mohapatra S. та Rani A. [1–2], проаналізовано вплив мобільності на OLSR, AODV та інші класичні протоколи; показано зниження стабільності маршрутів і зростання затримки при високих швидкостях UAV. Наголошено, що традиційні проактивні алгоритми не враховують майбутню топологію, тому їх ефективність суттєво падає за динамічних змін мережі.

Останні дослідження орієнтовані на прогнозні підходи. У роботах Sun K. та Ben Samuel K. [3–4], запропоновано оцінювання майбутніх позицій UAV на основі моделей Gauss–Markov і ARIMA для підвищення надійності маршрутів. Урахування траскторних даних зменшує частоту перепобудови шляхів, однак не охоплює чергові затримки та стохастичні характеристики каналу. У [5] Shumeye Lakew D. та Dao N. -N. використали прогноз RSSI, проте без формування узагальненої метрики маршрутизації й мінімізації майбутньої затримки.

Поширеним є застосування просторово-часових функцій зв'язності. У роботах [6–7] Касілова О.В., Дмитрука К.С., Пустовойтова П.Є. та Компанійця В.О., подано моделі прогнозованої якості каналу для роєвих систем на основі геометричних і стохастичних параметрів руху. Показано підвищення стабільності маршруту до 15–20%, але здебільшого без урахування чергових затримок і динамічного навантаження.

Українські дослідження [8–9] Пустовойтова П.Є., Савченко М.В. спрямовані на адаптивний вибір метрики з урахуванням енергетичних параметрів і ваги каналів, проте не використовують прогноз руху UAV. У [10] запропоновано ML-підхід до вибору маршрутів, однак без фор-

мальної аналітичної моделі та аналізу прогнозованих характеристик каналу.

Отже, існуючі підходи охоплюють окремі аспекти задачі: класичні протоколи не враховують прогноз руху; позиційні моделі ігнорують затримки й стохастичну каналу; RSSI- та енергетичні методи не забезпечують мінімізації чергової затримки; ML-рішення часто позбавлені строгого математичного обґрунтування. Водночас відсутня комплексна прогнозно-орієнтована модель, що одночасно враховує майбутню часово-просторову топологію, імовірність збереження каналу, прогнозовану чергову затримку та узагальнену метрику маршрутизації. Усунення цієї прогалини становить основу запропонованої в статті моделі.

Постановка завдання. Аналіз підходів до маршрутизації в роєвих MESH-мережах показує недостатню ефективність традиційних протоколів за умов високої мобільності вузлів. Зокрема, OLSR враховує лише поточну топологію, тоді як у мережах дронів вирішальним є прогноз майбутнього стану: очікувані відстані між вузлами, стійкість каналів і прогнозована чергова затримка. Відсутність інтегрованої прогнозовної метрики призводить до зростання затримки та зниження рівня доставки пакетів.

Метою дослідження є розроблення прогнозно-орієнтованої моделі маршрутизації для роєвих MESH-мереж дронів, що забезпечує зменшення середньої затримки та підвищення стабільності маршрутів завдяки врахуванню часово-просторової динаміки та стохастичних характеристик каналів.

Для досягнення мети передбачено: формування математичної моделі прогнозування руху дронів за навігаційними параметрами; побудову моделі прогнозованої чергової затримки з урахуванням навантаження та часу життя з'єднання; синтез узагальненої метрики маршруту, що поєднує затримку й імовірність збереження каналу; розроблення алгоритму вибору оптимального маршруту в умовах динамічної топології; реалізацію підходу в середовищі OMNeT++/INET та порівняльне моделювання з OLSR за показниками середньої затримки, Packet Delivery Ratio, стабільності й довжини маршрутів.

Виконання цих задач дозволяє обґрунтувати ефективність прогнозно-орієнтованого маршрутизатора для сучасних роєвих систем дронів.

Виклад основного матеріалу. *Формалізація математичного апарату прогнозно-орієнтованої маршрутизації.*

Створення ефективного маршрутизатора для роєвих MESH-мереж потребує формалізації руху

дронів, оцінки їх майбутньої топології та характеристики якості міжвузлових каналів. У мобільних роєвих системах топологія змінюється швидко, тому алгоритм має враховувати саме прогнозовану конфігурацію мережі, а не лише поточну. Почнемо з побудови математичного апарату, що описує майбутнє положення вузлів і дає можливість оцінити стабільність каналу завчасно.

Положення дрона i у момент часу $t + \Delta t$ оцінюється на основі навігаційних параметрів поточного моменту. Найпростіший варіант прогнозування реалізується лінійною екстраполяцією:

$$\hat{r}_i(t + \Delta t) = r_i(t) + v_i(t)\Delta t, \quad (1)$$

де $r_i(t)$ – поточний вектор положення, $v_i(t)$ – вектор швидкості, а Δt – горизонт прогнозу. Такий підхід є базовим для дронів зі слабким маневруванням. Для реальних роєвих груп, де часто відбуваються активні зміни курсу, бажано використовувати уточнену модель, що враховує прискорення:

$$\Delta t) = r_i(t) + v_i(t)\Delta t + \frac{1}{2}a_i(t)\Delta t^2, \quad (2)$$

де $a_i(t)$ – оцінка прискорення, яка дозволяє підвищити точність прогнозування траєкторії.

Після того як прогнозовані координати визначені, можна обчислити прогнозовану майбутню відстань між вузлами i та j . З цією метою використовується евклідова метрика:

$$d_{ij}(t + \Delta t) = \|\hat{r}_i(t + \Delta t) - \hat{r}_j(t + \Delta t)\|. \quad (3)$$

Відстань є ключовим параметром, що визначає, чи буде збережений радіоканал між вузлами. У роєвих бездротових мережах доступність каналу істотно змінюється в часі, тому необхідний підхід, який пов'язує геометрію руху з імовірністю зв'язку. Це приводить до введення функції збереження каналу, що згасає із збільшенням відстані:

$$P_{ij}^{link}(t + \Delta t) = \exp\left(-\frac{d_{ij}(t + \Delta t)}{R}\right), \quad (4)$$

де R – характерний радіус зв'язку. Чим більше прогнозована відстань, тим менше значення P_{ij}^{link} , що фізично узгоджується зі зменшенням SNR та збільшенням ймовірності розриву з'єднання.

Однак якість майбутнього каналу визначається не лише відстанню, а й тенденцією руху вузлів. Тому вводиться оцінка залишкового часу життя каналу:

$$T_{ij}^{life} = \frac{R - d_{ij}(t)}{\dot{d}_{ij}(t)}, \quad (5)$$

де $\dot{d}_{ij}(t)$ – швидкість збільшення або зменшення відстані між вузлами. Позитивне значення означає, що вузли віддаляються, а канал скоро розірветься; негативне – що вони наближаються. Ця

величина дозволяє кількісно враховувати стабільність з'єднання.

Оцінка прогнозованої затримки передавання даних через один канал формується шляхом поєднання стандартної чергової затримки та штрафу за нестабільність каналу. Чергова складова описується узагальненою моделлю M/M/1:

$$D_{ij} = D_0 + \frac{1}{\mu - \lambda_{ij}}, \quad (6)$$

де D_0 – початкова радіозатримка, μ – пропускна здатність каналу, а λ_{ij} – інтенсивність потоку пакетів. Проте якщо канал буде розірвано раніше, ніж пакет завершить доставку, його затримка фактично зростає. Саме тому вводиться прогнозована затримка:

$$\hat{D}_{ij} = D_{ij} + \beta \frac{1}{T_{ij}^{life}}, \quad (7)$$

де β – ваговий коефіцієнт, що встановлює, наскільки сильно нестабільність каналу впливає на вибір маршруту.

Для інтеграції впливу прогнозованої затримки та прогнозованої стійкості зв'язку формується узагальнена вага ребра графа маршрутизації:

$$w_{ij}(t) = \frac{\hat{D}_{ij}}{P_{ij}^{link}(t + \Delta t)}. \quad (8)$$

Низьке значення $w_{ij}(t)$ відповідає якісному, стабільному і малозатратному щодо затримок каналу. Такий підхід дозволяє забезпечити перевагу тим маршрутам, які не лише короткі, але й мають високу ймовірність збереження у найближчому майбутньому.

Для маршруту, що складається з послідовності вузлів $p = \{i_1, i_2, \dots, i_k\}$, сумарна прогнозована затримка передавання визначається як:

$$D(p) = \sum_{m=1}^{k-1} \hat{D}_{i_m i_{m+1}}. \quad (9)$$

Аналогічно формується узагальнена якість маршруту:

$$Q(p) = \sum_{m=1}^{k-1} w_{i_m i_{m+1}}. \quad (10)$$

Саме функціонал $Q(p)$ виступає критерієм оптимальності, за яким обирається найкращий маршрут у прогнозованій топології. Тоді задача визначення оптимального шляху формально записується як:

$$p^* = \arg \min_{p \in P} Q(p), \quad (11)$$

де P – множина всіх допустимих маршрутів у MESH-топології роєвої мережі.

Таким чином, отримана модель прогнозно-орієнтованої маршрутизації базується на комбінації геометричного прогнозування, стохастичної оцінки зв'язності та оцінки майбутніх затримок. Центральними є зв'язки між (1)–(4), що визначають майбутнє положення вузлів; формулами (5)–(7), що вимірюють стабільність і затримку каналів; та узагальненим критерієм (8)–(11), який формує глобальну оптимізаційну задачу.

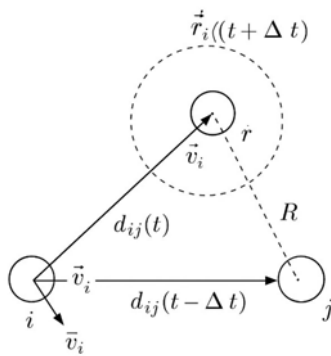


Рис. 1. Геометрія прогнозування положення дронів та оцінки майбутньої зв'язності

На рисунку 1 показано принцип прогнозування топології MESH-мережі. Дрони i та j мають відомі поточні положення $r_i(t)$ і $r_j(t)$, а також вектори швидкості. Метод екстраполяції дозволяє оцінити їх прогнозовані координати $\hat{r}_i(t + \Delta t)$ і $\hat{r}_j(t + \Delta t)$, на основі яких обчислюється майбутня відстань $d_{ij}(t + \Delta t)$. У зоні навколо прогнозованого положення позначено радіус можливого зв'язку R , що дозволяє визначити ймовірність збереження каналу. Така геометрична інтерпретація безпосередньо відповідає формальним залежностям (1)–(4) і є основою для оцінки стабільності маршруту в динамічних роєвих мережах.

Моделювання та дослідження запропонованої моделі.

Ефективність прогнозно-орієнтованої моделі маршрутизації оцінено шляхом моделювання в OMNeT++ 6.0 з використанням INET 4.x та MANET-модулів. Метою було визначити вплив урахування прогнозованої топології та стійкості каналів на середню затримку, стабільність маршрутів і загальну якість функціонування MESH-мережі дронів. Запропонований протокол порівнювався з класичним OLSR.

OLSR – проактивний протокол стану ліній зв'язку, що підтримує таблиці маршрутизації через періодичний обмін службовими повідомленнями. Механізм Multipoint Relays (MPR) зменшує обсяг службового трафіку за рахунок вибору мінімального набору ретрансляторів.

Однак у високомобільних роєвих мережах OLSR має обмеження: він враховує лише поточний стан зв'язків і не прогнозує зміни топології. Це спричиняє швидку втрату актуальності маршрутів, зростання затримки, втрати пакетів і часті перебудови, що обґрунтовує його використання як базового протоколу для порівняння.

Оскільки реалізація моделі вимагає оцінювання майбутньої топології, у симуляційному середовищі було задіяно кілька моделей мобільності: Gauss–Markov для згладжених траєкторій, Random Waypoint для хаотичного переміщення та Spline-based Mobility для сценаріїв з керованими траєкторіями дронів. Прогнозна метрика маршрутизації була інтегрована у модуль RoutingTableParser шляхом модифікації функції обчислення ваги ребер графа, що дозволило маршрутизатору використовувати узагальнену метрику w_{ij} , описану раніше. Вхідними даними для моделювання були траєкторії дронів, параметри каналу, інтенсивність трафіку, площа покриття, а також характеристики рухомих вузлів, що дозволило відтворити динаміку роєвої мережі з різними рівнями мобільності.

Для забезпечення відтворюваності експерименту було сформовано таблицю основних параметрів моделювання.

Оцінювання ефективності маршрутизації здійснювалося за кількома ключовими метриками. Першою і основною метрикою була середня затримка пакетів, що визначається як

$$D_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D(p_k), \quad (12)$$

де N – кількість доставлених пакетів, а $D(p_k)$ – затримка доставки k -го пакета за маршрутом p_k . Другою метрикою була частка стабільних маршрутів, тобто таких, що не зазнали розриву протягом передачі трафіку. Важливою характеристикою була також середня довжина маршруту за кількістю переходів, що дозволяє порівняти структуру побудованих шляхів між протоколами. Для комплексної оцінки якості функціонування мережі використовувалася метрика Packet Delivery Ratio (PDR), яка відображає частку успішно доставлених пакетів, а також частота перепобудови маршрутів – показник, що ілюструє, наскільки часто протокол вимушений змінювати шлях через рухливості вузлів.

Результати моделювання подано у вигляді графічних залежностей. Графік на рис. 2 відображає зміну середньої затримки залежно від швидкості руху дронів, де запропонований протокол демон-

Основні параметри моделювання MESH-мережі дронів

Параметр	Значення	Коментар
Кількість дронів	30	Росва MESH-конфігурація
Площа симуляції	1000 × 1000 м	Відкрита територія
Моделі мобільності	Gauss–Markov, Random Waypoint, Spline-based	Перевірка стабільності
Радіус зв'язку R	200 м	Фізичний рівень INET
Горизонт прогнозу Δt	0,3 с	Оптимально для UAV
Швидкість дронів	5–20 м/с	Низька та висока мобільність
Трафік	UDP, 512 байт, 10 pkt/s	Односпрямований потік
Протоколи порівняння	OLSR, Proposed	Базовий та прогнозний
Тривалість симуляції	300 с	Статистично достатньо
Кількість повторів	10	Усереднення результатів

струє зменшення затримки на 10–13% порівняно з OLSR, особливо у зонах високої мобільності.

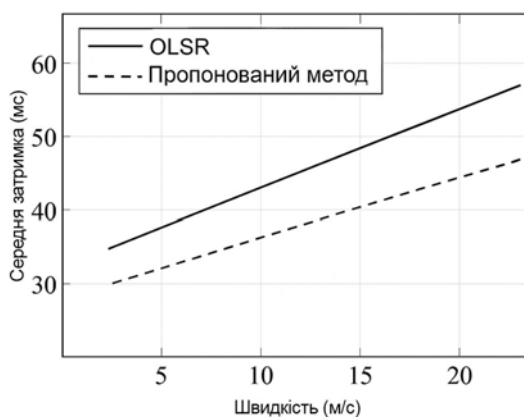


Рис. 2. Графік залежності середньої затримки від швидкості дронів у порівнянні двох методів

Графік на рис. 3. представляє залежність Packet Delivery Ratio від швидкості переміщення, що показує збереження PDR на рівні 92–95% для прогнозного маршрутизатора проти 84–88% для OLSR.

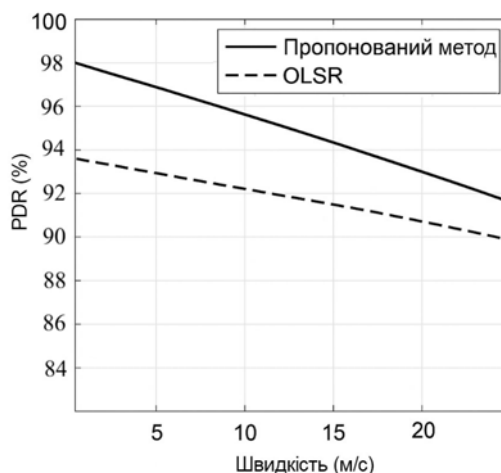


Рис. 3. Packet Delivery Ratio при різних швидкостях руху дронів для запропонованого методу та OLSR

Графік на рис. 4. ілюструє частку стабільних маршрутів, яка зростає майже на 20% завдяки прогнозуванню топології.

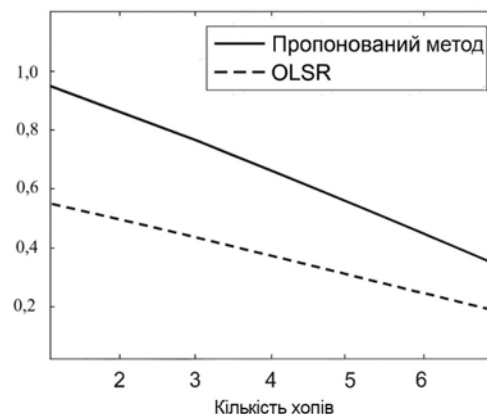


Рис. 4. Частка стабільних маршрутів залежно від кількості хопів

Окремо на рис. 5. проаналізовано середню довжину маршруту, де протокол демонструє оптимальні рішення з меншим числом переходів, що зменшує навантаження на вузли і знижує ймовірність розриву.

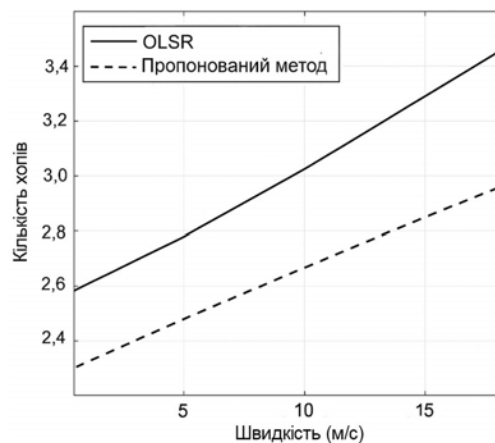


Рис. 5. Середня довжина маршруту (hop-count) при різних швидкостях дронів

Результати моделювання підтверджують, що запропонована модель покращує ключові характеристики мережі: підвищує стабільність маршрутів, зменшує середню затримку та загальну навантаженість. Перевагою є відсутність змін на фізичному рівні – удосконалюється лише метрика маршрутизації. Це забезпечує адаптивність і ефективність у динамічних UAV-сценаріях та свідчить про практичну придатність підходу.

Висновки. У роботі запропоновано прогнозно-орієнтовану модель маршрутизації для роєвих MESH-мереж дронів, що враховує майбутню часово-просторову конфігурацію та стохастичні характеристики каналів зв'язку. На відміну від традиційних алгоритмів, які спираються лише на поточну топологію, підхід використовує прогноз траєкторій руху та ймовірність збереження між-

вузлових з'єднань, що забезпечує формування більш стабільних маршрутів.

Метрика маршрутизації поєднує оцінку стійкості каналу й прогнозовану якість шляху, надаючи пріоритет маршрутам із високою ймовірністю збереження працездатності після зміни топології. Моделювання в середовищі OMNeT++/INET показало зменшення середньої затримки на 10–13% порівняно з OLSR, підвищення Packet Delivery Ratio на 7–9% та зростання частки стабільних маршрутів приблизно на 20%. Також спостерігається зменшення середньої довжини маршрутів (hop-count).

Запропонований метод інтегрується як нова метрика без змін фізичного чи каналного рівнів і може застосовуватись у високодинамічних роєвих мережах дронів для підвищення стабільності та зниження затримок.

Список літератури:

1. Mohapatra S., Kanungo P. Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV Routing Protocols using NS2 Simulator. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 30. P. 69-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.835>
2. Rani A., Bhardwaj V. Performance Analysis of Routing Protocols for FANETs. 2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kamand, India. 2024. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT61001.2024.10724067>
3. Sun K., Liu M., Yin C., Wang Q. Adaptive Extended Kalman Prediction-Based SDN-FANET Segmented Hybrid Routing Scheme. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 5:1417. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25051417>
4. Ben Samuel K., Wolthusen S. D., Sansa Otim J., Nyongarwizi Akol R., Nsabagwa M. Routing Protocols and Mobility Predictions for UAV Data Collection From Agricultural Sites: A Survey. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 108626-108640. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3582163>
5. Shumeye Lakew D., Sa'ad U., Dao N. -N., Na W., Cho S. Routing in Flying Ad Hoc Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, no. 2. P. 1071-1120. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2982452>
6. Касілов О.В., Дмитрук К.С. Модель динамічного балансування навантаження в роєвій мережі дронів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 4. С. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/07>
7. Компанієць В. О., Пустовойтов П. Є. Модель масштабування мережі на основі стохастичних процесів за умов самоподібного трафіку. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 3. С. 71-79. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/10>
8. Пустовойтов П.Є., Воронець О.М. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахування QoS та енергозбереження. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання*. 2025. Т. 1, № 1(13). С. 64-79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>
9. Савченко М.В., Шиман М.В., метод аналізу завантаження вузлів кластеру mesh-мережі на основі математичної моделі мереж Джексона. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2025. Т. 1, № 79. С. 201-204. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.201-204>
10. Mughal U. A., Hassler S. C, Ismail M. Machine Learning-Based Intrusion Detection for Swarm of Unmanned Aerial Vehicles. 2023 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS), Orlando, FL, USA. 2023. P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1109/CNS59707.2023.10288962>

Konovalov D.H., Yakovenko I.V. A PREDICTION-ORIENTED ROUTING MODEL FOR DELAY REDUCTION IN DRONE SWARMS

The article considers the problem of ensuring effective routing in drone swarm wireless MESH networks under conditions of high mobility and rapid topology change. It is shown that traditional proactive protocols, in particular OLSR, are focused exclusively on the current state of the network and do not take into account the predicted evolution of the mutual location of nodes, which leads to frequent route reconstructions, increased delay and reduced packet delivery.

A prediction-oriented routing model is proposed that integrates geometric prediction of drone movement trajectories, stochastic estimation of the probability of preserving inter-node channels and a model of predicted next delay based on M/M/1. A generalized time-space route metric is formed, which takes into account the future topology configuration and the expected quality of communication. Unlike classical approaches, the proposed algorithm minimizes the route weight taking into account the predicted changes, which allows to increase the network's resistance to dynamic influences and reduce the probability of channel breakage.

The model implementation was performed in the OMNeT++/INET environment with subsequent comparison with the basic OLSR protocol. According to the simulation results, a decrease in the average packet transmission delay by 10–13%, an increase in the Packet Delivery Ratio by 7–9%, and an increase in the share of stable routes by approximately 20% with an increase in the speed of drones were established. Additionally, a reduction in the average route length was recorded, which reduces the load on nodes and increases the overall network efficiency.

The proposed approach does not require modification of the physical or link layer and can be integrated into existing router stack architectures as a new path selection metric. The results obtained confirm the feasibility of using predictive routing for building highly stable and low-latency drone swarm networks in scenarios with increased mobility.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, MESH network, drone swarm, quality of service, stochastic model, routing, communication channel, delay, traffic forecasting.*

Дата першого надходження статті до видання: 24.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 621.391.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/07>**Михалевський Д.В.**<https://orcid.org/0000-0001-5797-164X>

Вінницький національний технічний університет

Василишин В.І.<https://orcid.org/0000-0002-5461-0125>Харківський національний університет повітряних сил
імені Івана Кожедуба**Коцюба В.П.**<https://orcid.org/0000-0001-6336-8193>Харківський національний економічний університет
імені Семена Кузнеця

ОЦІНЮВАННЯ ПОКРИТТЯ КОРПОРАТИВНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ МОДИФІКОВАНОЇ МОДЕЛІ ОКАМУРА-ХАТА

У роботі проведено дослідження можливості оцінювання покриття безпроводних корпоративних телекомунікаційних мереж на базі моделі Окамура-Хата із складною архітектурною забудовою. Для цього проведено аналіз моделі з точки зору параметрів затухання та потужності сигналу, що дало можливість визначити оптимальну адаптацію до умов поширення хвиль в діапазонах 2.4 ГГц та 5 ГГц із врахуванням втрат у вільному просторі, втрат пов'язаних із параметрами середовища та втрат на конкретних архітектурних перешкодах з використанням наперед визначеної бази коефіцієнтів та використання методу трасування променів.

Для отримання максимально наближених поверхонь поширення сигналу у приміщеннях, запропоновано модифіковану модель Окамура-Хата із врахуванням просторового розподілу за координатами приміщення. Для цього, було застосовано механізм перерахунку відстаней між передавачем та приймачем для кожної точки простору приміщення. Це дозволило застосувати результати експериментальних досліджень, як параметри для розрахунків покриття отриманих за допомогою діагностичних засобів клієнтських пристроїв.

Встановлено, що використання модифікованих моделей Окамура-Хата, як у базовому вигляді, так і з трасуванням променів, є доцільним для операцій прогнозування поширення хвиль в частотних діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц при умовах існування складних архітектурних перешкод. Стандартна модель Окамура-Хата є ефективною для попереднього та швидкого планування безпроводних корпоративних телекомунікаційних мереж, оскільки вона потребує мінімум ресурсів і забезпечує достатню точність. Модель із застосуванням трасування променів потребує калібрування параметрів архітектурних перешкод, особливо при складних забудовах, та проведення значної кількості розрахунків, але при цьому дозволяє підвищити точність у два і більше раз. Особливо це є актуальним для середовищ із високою щільністю точок доступу.

Ключові слова: модель оцінювання, безпроводні канали, корпоративна телекомунікаційна мережа, модель Окамура-Хата, статистичний аналіз.

Постановка проблеми. Оцінювання просторового розподілу радіосигналу є ключовим завданням у проектуванні сучасних безпроводних корпоративних телекомунікаційних мереж [1]. Класичні моделі затухання, такі як Okumura-Hata, ITU-R P.1238, COST231-Walfisch-Ikegami, Log-Distance Path Loss Model та ECC-33, традиційно застосовуються для сценаріїв оцінювання рівня

сигналу у радіоканалі між передавачем та приймачем, із подальшою просторовою інтерпретацією [2]. Проте розвиток багатоповерхових будівель, щільних міських середовищ та нових стандартів безпроводних систем потребує переведення цих моделей у тривимірний простір для підвищення точності прогнозування покриття та врахування відповідних факторів впливу, особливо багато-

променевого поширення хвиль. Одним із напрямків вирішенні такої проблеми є вдосконалення та адаптація існуючих моделей затухання до складних архітектурних забудов для підвищення ефективності методів та засобів планування та оптимізації ресурсів сучасних корпоративних телекомунікаційних мереж [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженнях, що присвячені поширенню хвиль та впливу геометрії середовища передачі, традиційно виділяють два основні підходи. Перший ґрунтується на детермінованих моделях, серед яких модель вільного простору та її модифікації, а також моделі, що враховують відбиття від земної поверхні та дифракційні явища [4]. Такі методи базуються на наперед відомих параметрах і не враховують випадкових факторів. Другий підхід представлений емпіричними моделями, зокрема Окумура-Хата, COST231, Уолфіша-Ікегами та іншими. Їхня особливість полягає у використанні результатів експериментальних вимірювань у різних умовах поширення сигналу та визначенні коефіцієнтів затухання [5].

Окрім цього, експериментальні дослідження дозволяють застосовувати статистичні методи для опису випадкових процесів у каналі. Наприклад, розподіл Релея використовується для моделювання завмирань, розподіл Райса – для каналів із прямою видимістю, а логнормальний розподіл – для опису затухання сигналу. Такі підходи знайшли широке застосування у практичному проектуванні та експлуатації бездротових мереж, проте мають певні обмеження. Зокрема, детерміновані та емпіричні моделі не завжди враховують усі фактори, що впливають на поширення сигналу, а статистичні методи потребують значного обсягу даних для досягнення високої точності [6–7]. Класичні моделі затухання часто виявляються недостатньо надійними у складних умовах щільної міської забудови чи всередині приміщень. Таким чином, детерміновані моделі мають високу точність, але обмежені у врахуванні випадкових факторів, емпіричні моделі базуються на вимірюваннях, проте не завжди універсальні, а статистичні методи оцінювання дозволяють описати випадкові процеси, але потребують великих даних. Результати досліджень у роботі [2026] підтверджують, що ні одна існуюча технологія передачі інформації не є універсальним чи оптимальним рішенням для всіх середовищ розгортання мереж. Проте, враховуючи особливості поширення хвиль доцільно виділити адаптацію певних моделей до конкретного середовища передачі інформації із

врахуванням відповідних факторів впливу, що є актуальним.

Постановка завдання. Метою роботи є вдосконалення моделі Окамура-Хата для оцінювання покриття у просторі приміщення із складною архітектурною забудовою для безпроводних корпоративних телекомунікаційних мереж.

Виклад основного матеріалу. Як відомо [9], пропускна здатність каналів корпоративних телекомунікаційних мереж та ймовірність виникнення помилок залежить від рівня потужності сигналу на вході приймача P_{RX} та параметрів середовища передачі. Оскільки, цей показник прямо пропорційно залежить від вихідної потужності передавача, то для розрахунку параметрів поширення сигналу доцільно використовувати рівняння бюджету каналу. Тоді, взаємозв'язок таких енергетичних параметрів пристроїв, які знаходяться на відстані один від одного, можна визначити із використанням параметру затухання сигналу та потужності сигналу на вході приймача, можна записати так:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L, \quad (1)$$

де P_{TX} – потужність передавача; G_{TX} – коефіцієнт підсилення антени передавача; G_{RX} – коефіцієнт підсилення антени приймача; L – втрати, які визначаються згідно моделі затухання.

Розглянемо затухання за моделлю Окамура-Хата. Як правило, така модель використовується для міських і приміських умов та базується на емпіричних дослідженнях Окамура та аналітичних апроксимаціях Хата. Класичний математичний запис можна представити так [2]:

$$L = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_{TX} - ah_{RX} + (44,9 - 6,55 \log h_{TX}) \log l \quad (2)$$

де: f – частота сигналу; h_{TX} – висота передавальної антени; h_{RX} – висота приймальної антени; l – відстань між приймачем та передавачем; a – поправка для висоти приймача.

Вираз (2) використовується для розрахунку втрат поширення хвиль у радіоканалах для міських і приміських умов. При оцінюванні затухання сигналу у корпоративних телекомунікаційних мережах, в умовах прямої видимості, можна застосовувати модифікований вираз [10]:

$$L_c = 20 \log l + 20 \log f - 27,55. \quad (3)$$

Враховуючи існування архітектурних перешкод у приміщеннях, додаткове затухання, яке залежить від типу та матеріалу визначається як:

$$L_n = 10b \log(l/l_0) + \sum_{i=1}^n k_i L_i, \quad (4)$$

де: l_0 – відстань, на якій вимірюють початкову

потужність сигналу як точку відліку; k_i – кількість однотипних перешкод; L_i – затухання сигналу при проходженні i -ї перешкоди; b – показник, який описує, наскільки швидко загасає сигнал зі збільшенням відстані у певному середовищі.

Таким чином, підставляючи (3) і (4) у (1) отримуємо:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - 20 \log l - 20 \log f + 27,55 - 10b \log(l/l_0) - \sum_{i=1}^n k_i L_i, \quad (5)$$

Вираз (5) є інтерпретацією емпіричної моделі Окамура-Хата для умов поширення хвиль в діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц, що є доцільним при використанні операцій оцінювання потужності сигналу на вході приймача, на базі енергетичного балансу радіоканалу. Модель враховує три групи факторів впливу: втрати у вільному просторі, втрати пов'язані із параметрами середовища та втрати на конкретних архітектурних перешкодах з використанням наперед визначеної бази коефіцієнтів. Як недоліки такої моделі, можна виділити відсутність урахування багатопроменевого поширення хвиль у просторі, що є критичним фактором у приміщеннях з великою кількістю відбиваючих поверхонь. Тому, для врахування такого фактору, можна застосувати модель трасування променів [11].

Передавальна антена засобів корпоративних телекомунікаційних систем має всенаправлену діаграму спрямованості, тому вона створює сукупність геометричних променів, які проходячи через середовище передачі інформації зазнають відбиття, заломлення та дифракції на об'єктах і перешкодах у приміщенні. В результаті на приймальній антені отримується векторна сума всіх променів із відповідними фазовими зсувами. Тоді, додаткове затухання буде мати наступний вигляд:

$$L_n^r = 10 \log \left| \sum_{i=1}^k A_i \cdot e^{j\phi_k} \right|^2, \quad (6)$$

де A_k – амплітуда k -го променя, ϕ_k – його фазовий зсув.

Для найбільш поширених випадків (прямої, відбитої, заломленої, згинаючої хвилі), A_k визначається так [8]:

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{\lambda}{4\pi l}, & A_s &= \frac{\lambda}{4\pi l} \prod_{i=1}^m \Gamma_m, \\ A_z &= \frac{\lambda}{4\pi l} \prod_{i=1}^m T_m e^{-\alpha_m t_m}, & A_o &= \frac{\lambda}{4\pi l} D(\theta_f, \theta_d, n), \end{aligned}$$

де Γ_m – коефіцієнт відбиття Френеля для m -ї поверхні; T_m – коефіцієнт пропускання для m -ї поверхні; α_m – коефіцієнт поглинання матеріалу, t_m – товщина стіни, D – коефіцієнт дифракції, який залежить від кута падіння θ_f , кута дифракції θ_d та параметра кута поширення сигналу.

Тоді вираз (5) можна записати наступним чином:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - 20 \log l - 20 \log f + 27,55 - 10 \log \left| \sum_{i=1}^k A_i \cdot e^{j\phi_k} \right|^2. \quad (7)$$

До переваг такої моделі можна віднести швидке оцінювання потужності сигналу для радіоканалу, а також підвищення точності для проблемних зон де виникають флуктуації сигналу із можливим високим рівнем затухання, особливо у місцях складної архітектурної забудови. Проте, для отримання максимально наближених поверхонь поширення сигналу у приміщеннях не вистачає врахування просторового розподілу за координатами приміщення. Для цього, застосуємо параметр d , як ширину приміщення. Площину поширення сигналу задамо масивом із розмірами $(l;d)$ [1]. Враховуючи типову побудову радіоканалу корпоративних телекомунікаційних мереж, для кожної точки $(l;d)$ необхідно обчислити відстань до передавача, в результаті чого отримується поверхня $P(l;d)$. Для розрахунку такої поверхні необхідно перерахувати математичну модель на базі масиву координат, який можна записати так:

$$(l,d) = \sqrt{(l-l_0)^2 + (d+d_0)^2}, \quad (8)$$

Якщо додати координату висоти приміщення h та врахувати контрольний вимір $(l_0;d_0) = (l;l)$ м від токи доступу, то вираз (5) можна записати так:

$$\begin{aligned} P_{RX} &= P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - (20 - 10b) \log \left(\sqrt{l^2 + d^2 + h^2} \right) - 20 \log f + 27,55 - \\ &\quad - \sum_{i=1}^n k_i^z L_i^z - \sum_{j=1}^m k_i^e L_i^e, \end{aligned} \quad (9)$$

де z – індекс який показує параметри горизонтальної i -ї архітектурної перешкоди в площині координат $(l;d)$; e – індекс j -ї перешкоди за координатою h .

Аналогічний результат можна отримати для виразу (7).

Для встановлення можливості оцінювання покриття у просторі приміщень із складною архітектурною забудовою, було застосовано модифіковані моделі Окамура-Хата до експериментальних даних розподілу сигналу отриманих у роботах [1] і [12], для радіоканалів стандарту Wi-Fi частотних діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц та координати $h=1,5$ м. Результати наведено на рис. 1 і рис. 2.

Як видно із результатів на рис. 1, похибка визначення положення точки доступу складає 1 м. Для такого випадку, модифікована модель Окамура-Хата забезпечує прийнятну точність (RMSE ≈ 5.5 дБм) і може використовуватись для попереднього планування покриття. Модель із застосуванням трасування променів із каліброваними параметрами для стін, не дає покращення і навіть погіршує результат, що потребує значних обчис-

лень коефіцієнтів відбиття та розсіювання. Для результатів на рис 2. спостерігається протилежна картина, де базова модель Окамура-Хата дає значну помилку, понад 8 дБм. При використанні трасування променів та двох порядків відбиття від стін помилка зменшується у два рази.

Розріз за координатою l демонструє найбільшу похибку обох моделей при довжині каналу більше 8 м, де сигнал має значне послаблення із помітними флуктуаціями із-за багатопроменевого поширення хвиль. Класична модель дає помилку до 7–9 дБм. Це приводить до переоцінювання рівня сигналу у дальніх зонах приміщення та в зонах за перешкодами, що передбачає проведення додаткових досліджень.

Висновки. Таким чином, встановлено, що моделі Окамура-Хата та Окамура-Хата із трасуванням променів можуть бути адаптовані для

просторового оцінювання поширення сигналу у приміщеннях із архітектурними перешкодами для частотних діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц. Параметри моделей можуть бути визначені з довідкових даних або шляхом простих вимірювань із застосуванням засобів абонентських пристроїв. Дослідження показали, що адаптована Модель Окамура-Хата підходить для швидкого оцінювання зони покриття корпоративних телекомунікаційних мереж при мінімальних обчислювальних ресурсах, при цьому забезпечуючи похибку $\pm 5..10$ дБм. При існуванні складної архітектурної забудови та щільному розгортанні точок доступу необхідно застосовувати трасування променів де можна зменшити похибку до ± 4 дБм, але це потребує значних обчислень та додаткових вимірювань, що є доцільним при застосуванні алгоритмів машинного навчання.

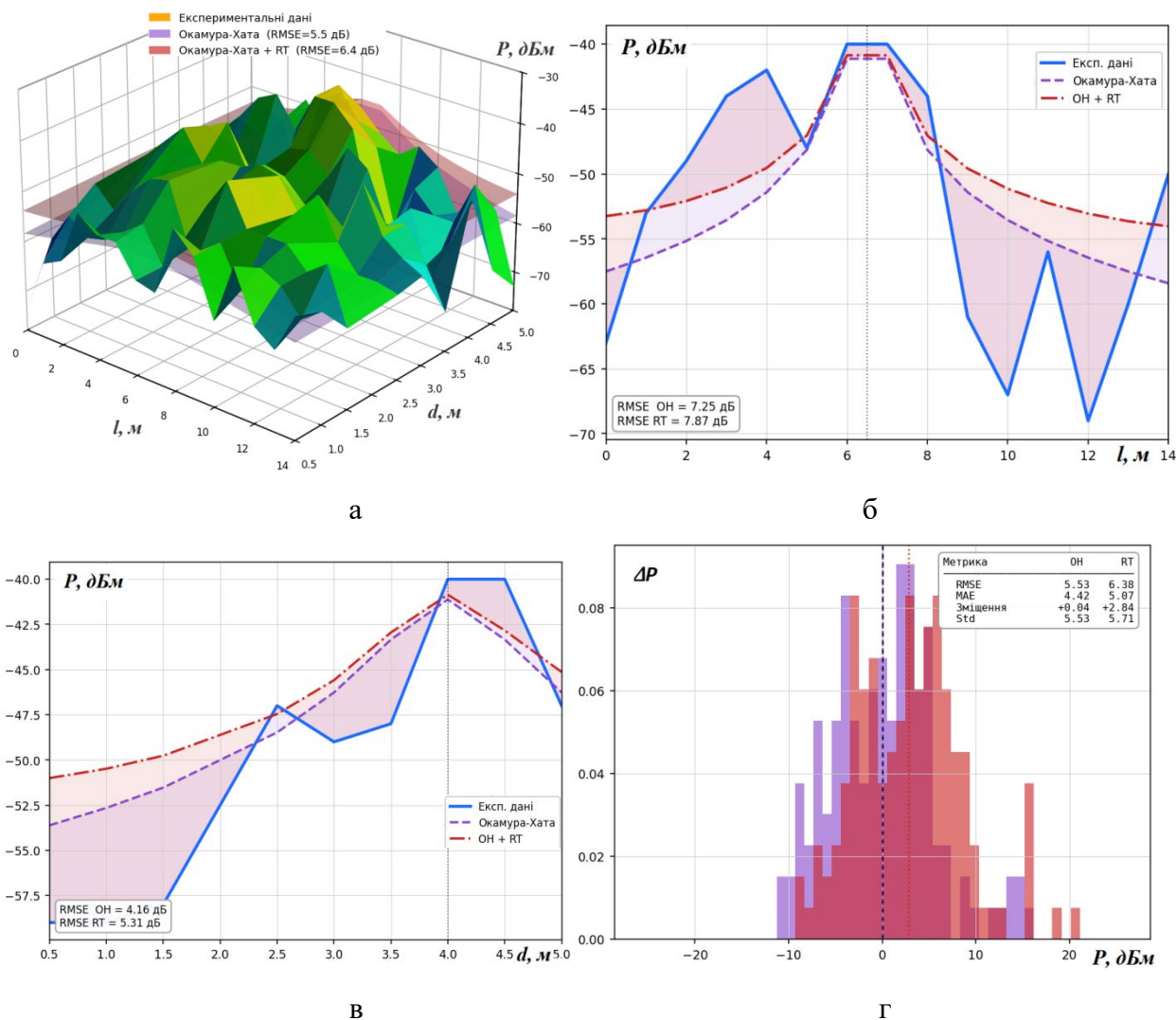


Рис. 1. Результати оцінювання розподілу сигналу у приміщенні для діапазону «2,4 ГГц: а – поверхні розподілу; б – розрізу за координатою l ; в – розрізу за координатою d ; г – похибок

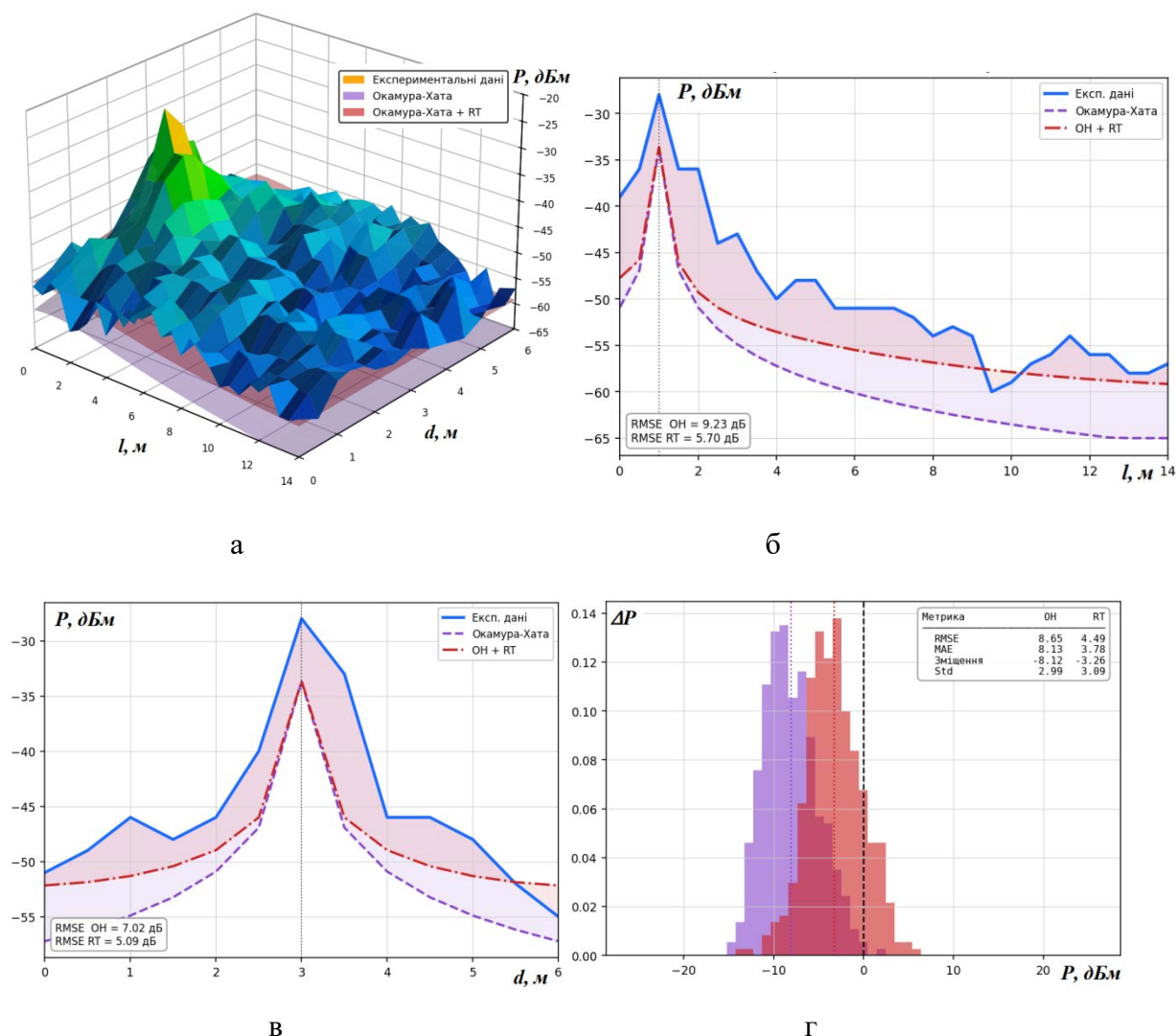


Рис. 2. Результати оцінювання розподілу сигналу у приміщенні для діапазону 5 ГГц: а – поверхні розподілу; б – розрізу за координатою L ; в – розрізу за координатою d ; г – похибок

Список літератури:

1. 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.
2. Abhayawardhana V.S., Wassell I.J., Crosby D., Sellars M.P., Brown M.G. Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems. *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st. Volume: 1. Pp 1-5. DOI: 10.1109/VETECS.2005.1543252*
3. 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.
4. Saunders S.R., Aragon-Zavala A. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems* (2nd Edition). Wiley. 2007. 524 p.
5. Sarkar T.K., Ji Z., Kim K., Medouri A., Salazar-Palma M. A survey of various propagation models for mobile communication. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2003. Vol. 45, № 3. Pp. 51-82.
6. 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.*
7. Mykhalevskiy D. V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*. 2019. № 1. Pp. 41-51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004.
8. Giannakoulas A., Karkanis N., Gavrilidis I., Kaifas T. N. F. *Propagation Models for Wireless Sensor Networks. Electronics*. 2026. 15. 925. Pp. 1-45. DOI: 10.3390/electronics15050925.

9. Mykhalevskiy D. V., Kychak V. M. Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard. Latvian journal of physics and technical sciences. 2019. № 2. Pp. 41-51. DOI: 10.2478/lpts-2019-0009.

10. Risi I., Arobo R.C., Amakiri A.R.C., Amonieah J. Performance Evaluation of Standard Path Loss Models for Cellular Network Systems. SSRG International Journal of Recent Engineering Science. 2024. Vol.11. Iss. 5. Pp. 1-6. DOI: 10.14445/23497157/IJRES-V11I5P101

11. Tarapiah S., Sulaiman B., Natsheh E., Atalla S., Kharmeh S.A., Rashed A. Optimized indoor radio signal prediction with 3D ray tracing model at 2.4 and 5 GHz. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2025. Vol. 14. No. 4. Pp. 2935~2946. DOI: 10.11591/eei.v14i4.9441

12. Mykhalevskiy, D.V. (2018). Construction of Mathematical Models for the Estimation of Signal Strength at the Input to the 802.11 Standard Receiver in a 5 GHz Band. EastenEuropean Journal of Enterprise Technologies, 6/9(96), 16–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983.

Mykhalevskiy D.V., Vasylyshyn V.I., Kotsiuba V.P. COVERAGE ASSESSMENT OF CORPORATE WIRELESS NETWORKS BASED ON A MODIFIED OKUMURA-HATA MODEL

In this paper, investigates the feasibility of coverage assessment for wireless corporate telecommunication networks based on the Okumura-Hata model within complex architectural environments. An analysis of the model was conducted regarding attenuation parameters and signal strength, which enabled the determination of optimal adaptation to wave propagation conditions in the 2.4 GHz and 5 GHz bands. This adaptation accounts for free-space path loss, environment-related losses, and losses caused by specific architectural obstacles using a predefined coefficient database and ray-tracing methods.

To obtain signal propagation surfaces that most closely match indoor environments, a modified Okumura-Hata model is proposed, incorporating spatial distribution according to room coordinates. For this purpose, a mechanism for recalculating distances between the transmitter and receiver for each point in the indoor space was applied. This allowed for the integration of experimental research results—obtained via client device diagnostic tools—as parameters for coverage calculations.

It was established that the use of modified Okumura-Hata models, both in their base form and with ray tracing, is appropriate for predicting wave propagation in the 2.4 GHz and 5 GHz frequency bands under conditions of complex architectural obstacles. The standard Okumura-Hata model is effective for preliminary and rapid planning of wireless corporate networks, as it requires minimal resources while providing sufficient accuracy. In contrast, the ray-tracing model requires calibration of architectural obstacle parameters, especially in complex layouts, and involves significant computational effort; however, it enhances accuracy by two times or more. This is particularly relevant for environments with a high density of access points.

Keywords: *assessment model, wireless channels, corporate telecommunication network, Okumura-Hata model, statistical analysis.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Тарасенко Є.В.<https://orcid.org/0009-0004-0506-6997>

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ СУПРОВОДУ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПЕРЕШКОД

У статті розглянуто проблему підвищення ефективності та завадостійкості радіолокаційних систем у задачах супроводу повітряних цілей, що ускладнюються зростанням щільності повітряного руху, появою малорозмірних і малопомітних об'єктів та застосуванням шумових і імітаційних перешкод. Особливу увагу зосереджено на початковому етапі функціонування РЛС – від первинного виявлення до зав'язки, підтвердження траєкторії та передачі цілі на подальші рівні управління. Показано, що помилки на цьому етапі мають накопичувальний характер і призводять до втрат цілей, формування хибних трас та перевантаження каналів обробки, тому статичні ймовірнісні критерії є недостатніми без урахування часових обмежень реального часу.

Запропоновано та мотивовано використання інтегрального ймовірнісно-часового показника «час взаємодії РЛС з об'єктом стеження» як узагальненої характеристики, що синтезує ймовірності успіху/зривів на етапах пошуку, зав'язки й підтвердження, а також випадкові затримки, зумовлені режимом огляду, обробкою та перешкодами. Наведено класифікацію показників ефективності й завадостійкості (ймовірнісні, часові, просторові та комплексні) і показано їх взаємозв'язок у сценаріях з маневруванням цілей та неповнотою вимірювань.

Виконано огляд і порівняння класів математичних моделей процесів функціонування РЛС у завадовому середовищі. Обґрунтовано доцільність комплексного підходу, у якому макрорівнева модель початкового супроводу реалізується у вигляді стохастичної GERT-мережі з ймовірностями переходів і розподілами тривалостей дуг та можливістю циклів повторного захоплення, а мікрорівневі процедури оцінювання стану цілі описуються фільтром Калмана та його модифікаціями з перспективою інтелектуального адаптивного налаштування параметрів. Сформульовано вимоги до нової моделі та методу, орієнтованих на аналітичне/напіваналітичне оцінювання розподілу часу взаємодії у різних перешкодових сценаріях і придатність для систем реального часу.

Ключові слова: радіолокаційна система, супровід повітряних цілей, завадостійкість РЛС, стохастичні моделі, фільтр Калмана, GERT-мережі, марковські процеси, траєкторія, алгоритми супроводу.

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного розвитку авіації, безпілотних літальних апаратів та високоточної зброї радіолокаційні системи (РЛС) залишаються базовим інструментом спостереження за повітряним простором і управління повітряною обстановкою. Вони забезпечують виявлення, розпізнавання та супроводження повітряних цілей, формують вхідну інформацію для систем протиповітряної оборони, управління польотами, навігації та моніторингу критично важливих об'єктів. З огляду на зростання щільності повітряного руху, появу малорозмірних і малопомітних цілей, а також широке використання активних і пасивних засобів радіоелектронної протидії, до РЛС висува-

ються підвищені вимоги щодо точності, швидкості та завадостійкості.

Особливої актуальності набуває аналіз так званого початкового етапу функціонування РЛС у задачі супроводу повітряних цілей. Під початковим етапом у даній роботі розуміється сукупність процесів від первинного виявлення об'єкта до формування та підтвердження його траєкторії, придатної для подальшого використання в системі управління. Тому, розглянута проблема є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи багатьох вчених зосереджені на підвищенні завадостійкості РЛС у складних умовах, де перешкоди впливають як на етап виявлення, так і на процедури зав'язки/підтвердження траєкто-

рій та подальший супровід. У напрямі адаптивного виявлення активно розвиваються підходи на основі узагальнених критеріїв (GLRT/Wald/Rao) для сценаріїв «clutter + jamming», що дозволяють формально враховувати параметричну невизначеність та структуру перешкод під час прийняття рішень [1-2].

Значну увагу приділяють імітаційним (descriptive) перешкодам, які формують хибні позначки та псевдоцілі й ускладнюють відбір достовірних вимірювань на старті супроводу. Актуальні публікації аналізують механізми формування таких перешкод і демонструють, що стабільність супроводу критично залежить від якості етапів track initiation/association і фільтрації в завадовому середовищі [3]. Паралельно з'являються оглядові роботи, які систематизують сучасні антидезаційні стратегії (prevention/detection/mitigation) та підкреслюють зсув акценту від «локальної» завадостійкості до системної стійкості ланцюжка «виявлення–ідентифікація–супровід» [4].

У задачах супроводу маневруючих цілей поширеним стандартом залишаються калманівські методи та їх модифікації, зокрема IMM та схеми з імовірнісною асоціацією вимірювань, що підвищують робастність у середовищах із завадами та «чужими» вимірюваннями (clutter) [5]. Водночас для слабких/малопомітних цілей активно розвивається підхід track-before-detect (зокрема багатоканальні процедури), який поєднує детекцію й супровід та дає вигоду за низького SNR [6].

Окремий сучасний тренд – інтеграція інтелектуальних методів для адаптації параметрів (порогів, режимів огляду, налаштувань фільтрації) під поточну завадову обстановку. Зокрема, публікації прямо орієнтуються на початковий етап супроводу та підкреслюють потребу в динамічній зміні параметрів обробки залежно від рівня перешкод і надійності сигналу [7]. Узагальнюючі огляди нейромережових підходів до супроводу також фіксують зростання ролі гібридних схем «NN + (Kalman/IMM)» для підсилення стійкості та зменшення кількості хибних трас [8].

Водночас, попри активний розвиток детекторів, антидезаційних методів і фільтрації, у публікаціях часто домінують локальні показники, тоді як інтегральні ймовірнісно-часові характеристики процесу «від першої позначки до стійкого супроводу/зриву» формалізуються рідше. Для заповнення цієї прогалини перспективними є мережеві стохастичні моделі, зокрема GERT-підхід, який природно описує альтернативні шляхи та цикли повторних спроб із випадковими тривалостями.

У суміжних задачах уже показана придатність GERT для аналізу розподілів часу в процесах із зворотними зв'язками [9-10].

Постановка завдання. Сучасний етап розвитку радіолокаційних систем супроводу повітряних цілей характеризується зростанням складності завадової обстановки, збільшенням щільності повітряного руху та появою мало-розмірних і малопомітних об'єктів. За цих умов вирішальне значення для забезпечення завадостійкості та ефективності функціонування РЛС має початковий етап супроводу цілей – від моменту первинного виявлення до формування та підтвердження траєкторії. Помилки, допущені на цьому етапі, мають накопичувальний характер і суттєво впливають на подальшу якість супроводу.

Аналіз наукових публікацій і існуючих підходів показує, що традиційні локальні показники ефективності не забезпечують повної та узгодженої оцінки роботи РЛС на початковому етапі супроводу в умовах навмисних перешкод. Крім того, наявні класи математичних моделей процесів функціонування РЛС – детерміновані, статистичні, марковські, мережеві, фільтраційні та інтелектуальні – здебільшого описують окремі аспекти задачі та не дають цілісного ймовірнісно-часового уявлення про процес початкового супроводу.

У зв'язку з цим виникає науково-методична проблема відсутності узагальненого підходу до оцінювання та моделювання завадостійкості РЛС на початковому етапі супроводу, який би поєднував макрорівневий опис послідовності станів супроводу з мікрорівневою траєкторною обробкою та враховував вплив навмисних перешкод.

Метою даної роботи є систематизація та критичний аналіз сучасних показників ефективності й математичних моделей процесів початкового супроводу повітряних цілей у радіолокаційних системах, а також обґрунтування доцільності використання інтегральних ймовірнісно-часових характеристик, зокрема часу взаємодії РЛС з об'єктом стеження, як узагальненого показника завадостійкості.

Для досягнення поставленої мети в статті необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати сучасні вимоги до РЛС супроводу повітряних цілей в умовах навмисних перешкод;
- узагальнити та класифікувати показники ефективності й завадостійкості, що застосовуються на початковому етапі супроводу;
- виконати критичний огляд існуючих класів математичних моделей процесів функціонування

РЛС та визначити їх переваги й обмеження щодо опису початкового етапу супроводу;

- обґрунтувати перспективність поєднання стохастичних мережевих моделей макrorівня з фільтраційними та інтелектуальними методами мікрорівня;

- сформулювати методологічні вимоги до побудови нових моделей і методів аналізу завадостійкості РЛС на початковому етапі супроводу.

Результати огляду створюють методичну основу для подальшої розробки комплексної ймовірно-часової моделі початкового супроводу повітряних цілей у радіолокаційних системах.

Виклад основного матеріалу

Сучасні вимоги до радіолокаційних систем у задачах супроводу повітряних цілей

Типовий вигляд індикаторного поля кругового огляду сучасної РЛС із відображенням трас повітряних цілей, завадових відміток та елементів інтерфейсу оператора наведено на рисунку 1.

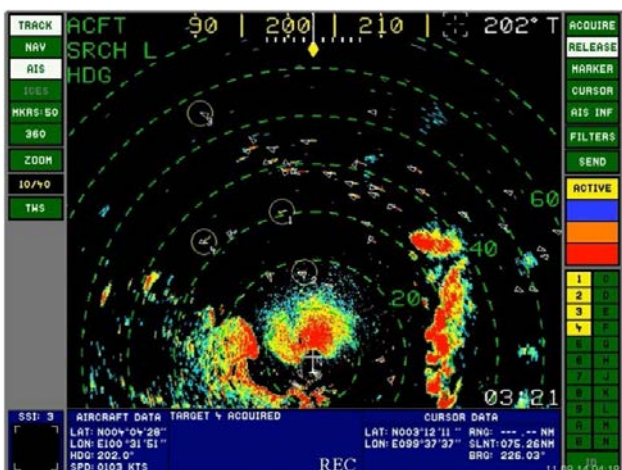


Рис. 1. Приклад кругового індикатора РЛС у режимі track-while-scan із відображенням декількох повітряних цілей

Класичні критерії ефективності радіолокаційних систем, ймовірність виявлення цілі, ймовірність хибної тривоги, точність визначення координат, пропускна здатність тощо, сьогодні розглядаються не ізольовано, а в контексті виконання складних комплексних задач управління. У реальних сценаріях функціонування залучені різноманітні об'єкти: керовані і некеровані літаки, крилаті та балістичні ракети, безпілотні літальні апарати, помилкові цілі. Це вимагає від РЛС не лише високої чутливості та роздільної здатності, але й здатності забезпечувати стабільний, безперервний супровід траєкторій у режимі реального часу, включно із ситуаціями маневрування та зміни динаміки руху.

Особливої актуальності набуває аналіз так званого початкового етапу функціонування РЛС у задачі супроводу повітряних цілей. Саме на цьому етапі виконується:

- виявлення об'єкта на фоні завад і шумів;
- зав'язка траєкторії, тобто групування послідовних позначок, які з достатньою достовірністю належать одній і тій самій цілі;

- підтвердження траєкторії за результатами кількох оглядів простору та прийняття рішення про доцільність її подальшого супроводження.

Узагальнений інформаційний потік на початковому етапі функціонування РЛС, від появи первинних позначок до формування підтвердженої траєкторії, придатної для подальшого супроводу та управління, показано на рисунку 2.

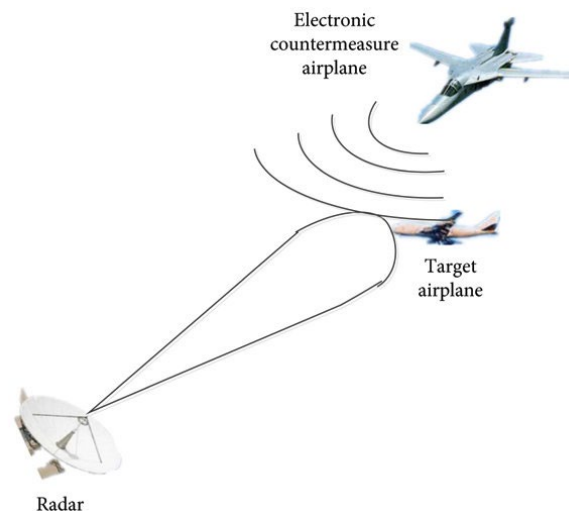


Рис. 2. Схематичне зображення геометрії активної радіоелектронної протидії: розташування літака-постановника перешкод відносно РЛС і повітряної цілі

Помилки на етапі початкового супроводу мають накопичувальний характер: некоректна зав'язка або запізниті підтвердження траєкторії призводять до втрати цілі, зростання кількості хибних трас, перевантаження каналів обробки та погіршення роботи всієї системи. Тому алгоритми початкового супроводу повинні бути стійкими до пропусків вимірювань, варіацій параметрів руху, завад і обмежених обчислювальних ресурсів.

Додатковою складністю є навмисний перешкодовий вплив. Шумові завади знижують ймовірність виявлення слабких сигналів, а імітаційні та структуровані перешкоди формують хибні позначки, що ускладнює оцінювання достовірності вимірювань і підвищує ризик помилкових рішень щодо зав'язки та підтвердження траєкторій.

За таких умов вирішального значення набувають часові аспекти функціонування РЛС: тривалість виявлення, інтервал стійкої зав'язки та збереження коректного супроводу. Ключовим стає не лише факт виявлення, а здатність системи забезпечити достатній «час взаємодії» з ціллю, протягом якого інформація залишається достовірною.

Це зумовлює вимоги до адаптивних і робастних алгоритмів початкового супроводу, узгоджених з часовими обмеженнями реального часу. У підсумку сучасні РЛС мають забезпечувати високу достовірність і стійкість виявлення та супроводу в умовах інтенсивних завад, що потребує моделей і методів, які враховують імовірнісну природу процесів, їх часову структуру та вплив перешкод на «час взаємодії» з ціллю.

Дослідження показників ефективності та завадостійкості РЛС на початковому етапі супроводу

Аналіз сучасних вимог до радіолокаційних систем показує, що узагальнені формулювання на кшталт «висока завадостійкість» або «надійний супровід» є недостатніми для інженерного проектування. Для обґрунтованого вибору структури РЛС і алгоритмів обробки необхідна формалізована система кількісних показників, орієнтована саме на початковий етап супроводу повітряних цілей, де важливі швидкість переходу до стійкого супроводу та чутливість до зривів під дією завад.

Традиційно ефективність РЛС описується імовірнісними показниками: імовірностями виявлення, хибної тривоги, зав'язки траєкторії, зриву захоплення, зриву супроводу та передачі цілі на наступний рівень управління. Вони характеризують стійкість процесу супроводу до випадкових флуктуацій і навмисних перешкод, однак не відображають своєчасності прийняття рішень.

Тому важливою є група часових показників, до яких належать час пошуку, виявлення, зав'язки та підтвердження супроводу, а також час до можливого зриву. В умовах інтенсивних перешкод саме часові затримки можуть стати критичними, оскільки затягування процесу супроводу знижує ефективність управління.

Доповнюють оцінку просторові показники, що визначають зону виявлення, роздільну здатність і точність оцінювання координат. На початковому етапі вони визначають область невизначеності положення цілі та впливають на ймовірність формування хибних трас, особливо за наявності завад.

Усі ці групи показників тісно взаємопов'язані, тому доцільним є використання інтегральних характеристик. Однією з них є узагальнений

показник часу взаємодії РЛС з ціллю на початковому етапі супроводу. Під часом взаємодії розуміється випадкова величина, що описує тривалість активної роботи системи з конкретною ціллю – від початкового виявлення до переходу в режим стійкого супроводу або до зриву під дією завад.

Час взаємодії інтегрує імовірнісні, часові та просторові аспекти функціонування РЛС, враховуючи повторні спроби зав'язки, тимчасові втрати цілі та вплив перешкод. Аналіз його розподілу дозволяє оцінити не лише середню тривалість взаємодії, але й імовірність своєчасного досягнення стійкого супроводу. З позицій завадостійкості цей показник є зручним інструментом для порівняння різних алгоритмів і сценаріїв перешкодового впливу та створює основу для подальшої ймовірнісно-часової формалізації процесу.

Отже, система показників ефективності та завадостійкості РЛС на початковому етапі супроводу, яка розглядається, включає:

- класичні імовірнісні показники виявлення та зривів;
- часові характеристики процесів пошуку, зав'язки й супроводу;
- просторові показники точності та зони спостереження;
- узагальнений інтегральний показник часу взаємодії, що поєднує всі перелічені аспекти в єдиній ймовірнісно-часовій рамці.

Саме навколо цього інтегрального показника в подальших дослідженнях буде будуватись математична GERT-модель функціонування РЛС в умовах навмисних перешкод, а також виконуватись порівняльний аналіз різних варіантів параметрів і сценаріїв роботи системи.

Огляд та класифікація математичних моделей процесів функціонування РЛС в умовах перешкод

Аналіз ефективності та завадостійкості РЛС неминуче пов'язаний із вибором математичних моделей, які описують процеси виявлення та початкового супроводу повітряних цілей. Від типу моделі залежить не лише точність оцінок, а й можливість отримання аналітичних виразів для ймовірнісно-часових характеристик, зокрема розподілу часу взаємодії РЛС із ціллю в умовах перешкод.

Класичні детерміновані та статистичні моделі (енергетичні рівняння радіолокації, розподіли сигналів і шумів, теорія виявлення) дозволяють коректно оцінювати локальні показники, такі як імовірність виявлення за заданого співвідношення сигнал/шум. Однак вони, як правило, описують

одноразовий акт прийняття рішення й не враховують послідовний характер процесу зав'язки та підтвердження траєкторії з можливими пропусками та тимчасовими втратами цілі.

Марковські та мережеві моделі подають функціонування РЛС у вигляді послідовності станів і переходів між ними, що дозволяє враховувати повторюваність подій і отримувати узагальнені ймовірнісні характеристики, зокрема ймовірність досягнення стійкого супроводу. Водночас часові аспекти в таких моделях часто задаються спрощено або потребують переходу до напівмарковських схем, що ускладнює аналіз.

Подальшим розвитком мережевого підходу є застосування стохастичних мереж, зокрема GERT-мереж, які дають змогу одночасно враховувати ймовірності переходів, часові затримки та наявність циклів, що відповідають повторним спробам зав'язки або поверненню до пошуку. Це робить їх зручним інструментом для опису «життєвого циклу» цілі на початковому етапі взаємодії з РЛС та дослідження розподілу часу взаємодії.

У задачах супроводу траєкторій широко застосовуються фільтр Калмана та його модифікації, які забезпечують ефективне оцінювання координат і швидкостей цілі в умовах шумів і пропусків вимірювань. Проте ці методи зосереджені на мікрорівні обробки вже сформованої послідовності вимірювань і не описують системний процес переходу від пошуку до стійкого супроводу з урахуванням ймовірнісних подій зав'язки та зриву.

Інтелектуальні та машинно-навчальні методи забезпечують адаптацію до складних завадових умов і використовуються для класифікації, оптимізації режимів та налаштування параметрів РЛС. Водночас вони переважно орієнтовані на локальні задачі й не дають прозорих аналітичних виразів для інтегральних часових характеристик, що зумовлює залежність оцінок від імітаційного моделювання.

Таким чином, жоден із підходів окремо не забезпечує повного опису початкового етапу супроводу в термінах інтегральних ймовірнісно-часових показників, що обґрунтовує доцільність використання моделей, здатних поєднувати ймовірнісну та часову структуру процесу.

Аналіз контексту показав, що доцільним видається комплексний підхід, у якому макрорівнева ймовірнісно-часова модель процесу початкового супроводу будується на основі GERT-мережі, а мікрорівневі процедури оцінювання стану цілі реалізуються за допомогою фільтра Калмана та інтелектуальних модулів налаштування пара-

метрів. Така інтеграція дозволяє, з одного боку, отримати аналітичні характеристики розподілу часу взаємодії РЛС з об'єктом стеження в різних перешкодових сценаріях, а з іншого врахувати реальні можливості алгоритмів супроводу та їх адаптивну поведінку.

Саме на розробку й дослідження подібної інтегрованої моделі спрямовані подальші роботи, де пропонується конкретна GERT-структура початкового етапу, узгоджена з застосуванням фільтра Калмана та інтелектуальних методів керування супроводом цілей.

Аналіз обмежень існуючих підходів і формулювання вимог до нової моделі та методу

Аналіз існуючих підходів до математичної формалізації показує, що задача дослідження розподілу часу взаємодії РЛС з ціллю на початковому етапі супроводу в умовах навмисних перешкод не може бути адекватно розв'язана в межах однієї технології моделювання. Класичні детерміновані та статистичні моделі орієнтовані на одноразовий акт виявлення й дозволяють оцінювати локальні показники (ймовірність виявлення, хибної тривоги тощо), але не описують послідовний характер процесу зав'язки, повторні спроби, тимчасові втрати та повернення до пошуку. Тому вони непридатні для аналізу інтегрального показника часу взаємодії, де важливим є сам шлях розвитку процесу.

Марковські та напівмарковські моделі частково враховують послідовність станів, однак або не мають явного фізичного часу, або оперують фіксованими чи слабо інтерпретованими часовими параметрами. Це обмежує їх застосування для опису реальних процесів РЛС, у яких тривалості операцій є різномірними та випадковими, особливо в умовах перешкод.

Стохастичні мережі, зокрема GERT-мережі, дозволяють одночасно враховувати ймовірності переходів, часові розподіли, альтернативні шляхи та цикли, що робить їх перспективними для макрорівневого опису процесу початкового супроводу. Проте в типових постановках вони використовують спрощені часові розподіли та враховують вплив перешкод у вигляді грубих поправок, що знижує їх прикладну цінність для синтезу конкретних алгоритмів РЛС.

Алгоритми фільтра Калмана та його модифікації є ефективними для мікрорівневої траєкторної обробки, але не описують процес зав'язки траєкторії та слабо пристосовані до негаусівських завад. Інтелектуальні та машинно-навчальні методи забезпечують адаптивність, однак потре-

бують великих обсягів даних і часто мають «чорний ящик»-характер, що ускладнює аналітичний опис часових характеристик.

Узагальнення цих обмежень вказує на відсутність цілісної моделі, яка б одночасно описувала послідовність станів початкового супроводу, містила явний часовий вимір та враховувала структурний вплив навмисних перешкод. У зв'язку з цим обґрунтовується необхідність інтегрованого підходу, що поєднує макрорівневу стохастичну модель у вигляді GERT-мережі з мікрорівневими алгоритмами фільтрації стану та інтелектуальними механізмами адаптації параметрів, забезпечуючи аналітичне дослідження розподілу часу взаємодії РЛС з повітряною ціллю.

Висновки. У роботі виконано аналіз сучасних вимог до радіолокаційних систем у задачах супроводу повітряних цілей, показників ефективності та завадостійкості на початковому етапі супроводу, а також підходів до математичного моделювання функціонування РЛС в умовах перешкод.

Показано, що за зростання щільності повітряного руху, появи малопомітних цілей і застосу-

вання навмисних перешкод вирішальну роль відіграє початковий етап супроводу – від виявлення до підтвердження траєкторії. Помилки на цьому етапі мають накопичувальний характер і визначають подальшу якість роботи системи.

Обґрунтовано недостатність традиційних локальних показників ефективності для повної оцінки РЛС. Запропоновано їх розширену класифікацію та введено інтегральний показник «часу взаємодії РЛС з об'єктом стеження» як узагальнену характеристику завадостійкості на початковому етапі.

Показано, що існуючі математичні моделі описують лише окремі аспекти процесу та не забезпечують комплексного ймовірно-часового опису початкового супроводу в умовах навмисних перешкод. Обґрунтовано доцільність поєднання стохастичних мереж типу GERT для макрорівневого опису, фільтра Калмана – для траєкторної обробки та інтелектуальних методів – для адаптації параметрів супроводу.

На основі проведеного аналізу сформульовано методологічну задачу та вимоги до нової моделі й методу подальших досліджень.

Список літератури:

1. Xincheng Jing, Hongtao Su, Lu Shen, Zhi Mao, Congyue Jia. Adaptive Radar Detection in the Clutter and Noise Cover Pulse Jamming Environment. *Signal Processing*. 2023. Vol. 205:108852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108852>
2. M. Sun, W. Liu, J. Liu, C. Hao. Rao and Wald Tests for Target Detection in Coherent Interference. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2022. Vol. 58, no. 3. P. 1906-1921. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3122833>
3. Lu S., Deng Y., Wu L., Li Q., Qin, G. Simulation of Monopulse Radar Under Jamming Environments Based on Space Slicing. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 18:5785. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25185785>
4. R. Li, S. Zhang, C. Zhang, Y. Liu, X. Li. Deep Learning Approach for Sparse Aperture ISAR Imaging and Autofocusing Based on Complex-Valued ADMM-Net. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, no. 3. P. 3437-3451. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3025053>
5. Y. Bar-Shalom, F. Daum, J. Huang. The probabilistic data association filter. *IEEE Control Systems Magazine*. 2009. Vol. 29, no. 6. P. 82-100. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCS.2009.934469>
6. W. Yi, Z. Fang, W. Li, R. Hoseinnezhad, L. Kong. Multi-Frame Track-Before-Detect Algorithm for Maneuvering Target Tracking. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69, no. 4. P. 4104-4118. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2976095>
7. Patrick U., Rao S. K., Jagan B. O. L., Rai H. M., Agarwal S., Pak, W. Radar-Based Target Tracking Using Deep Learning Approaches with Unscented Kalman Filter. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 18:8332. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14188332>
8. Ge F., Ding Y., Zhang Y., Zhang Y. A Review of Deep Learning Based Target Detection Algorithms. *Proceedings of the TEPEN International Workshop on Fault Diagnostic and Prognostic*. TEPEN 2024. Mechanisms and Machine Science. 2024. Vol. 141. P. 88-99. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-73407-6_9
9. João P. Hespanha. Modeling and analysis of networked control systems using stochastic hybrid systems. *Annual Reviews in Control*. 2014. Vol. 38, no. 2. P. 155-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2014.09.001>
10. Zeng Y., Duan R., Huang S., Feng T. Reliability analysis for complex systems based on generalized stochastic petri nets and EDA approach considering common cause failure. *Engineering Computations*. 2020. Vol. 37, no. 5. P. 1513–1530. DOI: <https://doi.org/10.1108/EC-05-2019-0241>

Tarasenko Ye.V. METHODOLOGICAL BASIS OF INTELLECTUAL METHODS OF ACCOMPANYING AIR TARGETS IN CONDITIONS OF RADIO ELECTRONIC INTERFERENCE

The article considers the problem of increasing the efficiency and noise immunity of radar systems in the tasks of tracking air targets, which are complicated by the increase in air traffic density, the appearance of small-sized and inconspicuous objects and the use of noise and imitation interference. Particular attention is focused on the initial stage of radar operation - from initial detection to tying, confirmation of the trajectory and transmission of the target to subsequent levels of control. It is shown that errors at this stage are cumulative and lead to loss of targets, the formation of false tracks and overloading of processing channels, therefore static probabilistic criteria are insufficient without taking into account real-time time constraints.

The use of the integral probabilistic-time indicator "time of interaction of the radar with the tracking object" as a generalized characteristic that synthesizes the probabilities of success/failures at the stages of search, tying and confirmation, as well as random delays caused by the viewing mode, processing and interference is proposed and motivated. The classification of efficiency and noise immunity indicators (probabilistic, temporal, spatial and complex) is presented and their relationship in scenarios with target maneuvering and incomplete measurements is shown.

A review and comparison of classes of mathematical models of radar operation processes in a noise environment is performed. The feasibility of a complex approach is substantiated, in which the macro-level model of initial tracking is implemented in the form of a stochastic GERT network with transition probabilities and distributions of arc durations and the possibility of re-capture cycles, and the micro-level procedures for assessing the target state are described by the Kalman filter and its modifications with the prospect of intelligent adaptive parameter tuning. Requirements for a new model and method focused on analytical/semi-analytical assessment of the interaction time distribution in various noise scenarios and suitability for real-time systems are formulated.

Keywords: radar system, air target tracking, radar noise immunity, stochastic models, Kalman filter, GERT networks, Markov processes, trajectory, tracking algorithms.

Дата першого надходження статті до видання: 10.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.577

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/09>

Безродний М.К.

<https://orcid.org/0000-0003-0793-7317>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вовк В.В.

<https://orcid.org/0009-0003-0014-5162>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ БАЙПАСУВАННЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОТОЧНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ СУШАРОК ЗЕРНА

Оптимізація схемних рішень технологічних процесів сушіння зернових для підвищення енергетичної ефективності та зниження вуглецевого сліду є необхідним науковим пошуком, що особливо важливо при використанні дороговартісних технологій, таких як теплові насоси. В статті наведено передумови даного дослідження та метод підвищення енергетичної ефективності теплонасосних рециркуляційних проточних сушарок зерна за рахунок часткового байпасування рециркуляційного сушильного агенту повз тепловий насос. Викладено відповідну математичну модель, побудовану на основі термодинамічного аналізу представленого схемного рішення теплонасосної сушарки. Приведено вихідні умови для чисельного аналізу, що дозволяє виконати співставлення з попередніми та аналогічними дослідженнями. Представлено отримані результати дослідження у графічному вигляді для основних визначальних величин – коефіцієнта трансформації теплового насоса, коефіцієнта рециркуляції та коефіцієнта використання енергії на видалення вологи з зерна. Зазначено обмеження використання певних теплових насосів, що засноване на необхідності перегріву сушильного агенту в конденсаторі, в залежності від коефіцієнта байпасування. Описано залежність для максимального коефіцієнта використання енергії на видалення вологи зерна для різних температур сушіння, який досягається при збільшенні коефіцієнта байпасування для всіх режимів роботи сушарки, та виконано співставлення з результатами дослідження для проточної теплонасосної сушарки без часткового байпасування рециркуляційного сушильного агенту повз тепловий насос. Отримані результати дослідження можуть бути основою при практичній реалізації теплонасосних сушарок зерна з байпасуванням теплового насоса або для інших прикладних чи наукових досліджень з урахуванням особливостей опитаної математичної моделі для стаціонарного режиму сушіння зернових.

Ключові слова: зерносушарка, енергоефективність, рециркуляція, тепловий насос, проточні сушарки, байпасування.

Постановка проблеми. Забезпечення стабільного вологісного стану зернових матеріалів є необхідною умовою їх зберігання та подальшого використання в технологічних ланцюгах агропромислового комплексу. Видалення вологи із зернової маси відбувається внаслідок складної взаємодії теплових і масообмінних процесів, реалізація яких потребує використання значних

обсягів енергії [1]. За цих умов сушіння зерна доцільно розглядати як багатопараметричну термодинамічну систему, ефективність якої визначається не лише величиною підведеної теплоти, а й способом її трансформації та використання в межах сушильної установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З позицій оцінювання енергетичної ефектив-



ності процес сушіння характеризується співвідношенням між корисним ефектом, що полягає у зниженні вологовмісту зерна, та сумарними витратами енергії, необхідними для реалізації видалення вологи і забезпечення транспортування сушильного агенту (СА). Витрата енергії безпосередньо на видалення вологи з зерна є базовою величиною [2] для визначення енергетичної ефективності сушарки. Даний показник залежить від особливостей організації технологічного циклу сушіння, схемних рішень рециркуляції зерна та сушильного агенту, і, безпосередньо, технологічних параметрів сушіння зерна [3]. Таким чином, оптимізація схемних рішень сушарок є одним з основних методів підвищення їх енергетичної ефективності [4].

В переважній більшості випадків технологічний процес сушіння зерна організовано на основі проточних сушильних комплексів [5] різноманітного типу. У проточних зерносушарках зернова маса перебуває в постійному русі, а разом із висушеним матеріалом з установки безперервно виноситься частина теплоти [2]. Це призводить до формування неізоентальпійного режиму в сушильній камері [4], за якого параметри СА на виході визначаються не лише процесом випаровування вологи, а й тепловим станом зерна, що залишає установку. За таких умов аналіз процесу сушіння потребує врахування повного теплового балансу сушильної камери (СК) та всієї сушильної установки.

Промислові проточні теплонасосні сушарки зерна (ТНСУ), як один з перспективних способів підвищення енергетичної ефективності [6], особливо з рециркуляцією СА [2], потребують ретельного наукового пошуку для їх удосконалення та досягнення максимальної енергетичної ефективності. Істотне зниження енергоємності проточних сушарок можливе за рахунок організації рециркуляції СА, що дозволяє повторно використовувати його тепловий потенціал [2] та забезпечити необхідні термовологісні умови, що особливо важливо для насінневого зерна та зерна специфічних культур [7].

У термодинамічному сенсі рециркуляція змінює структуру повітряних потоків сушильного агенту, зменшуючи частку свіжого повітря, яке потребує підігріву до робочих параметрів. Проте зростання коефіцієнта рециркуляції СА супроводжується підвищенням його вологовмісту, що накладає обмеження на допустимі режими роботи установки [8]. Тепловий насос (ТН) у подібних системах виконує подвійну функцію: у випарнику відбувається осушення повітряного потоку, тоді

як у конденсаторі - його нагрів до робочих температур [9].

Вплив рециркуляції сушильного агенту на енергоефективність процесу сушіння зерна є об'єктом численних досліджень та наукових праць з ухилом на практичні та теоретичні дослідження. Так в роботі [2] щодо порівняння камерних та проточних теплонасосних сушарок зерна з організацією рециркуляції сушильного агенту наведено методологію оцінки енергетичної ефективності та зроблено відповідні висновки та рекомендації. Особливістю організації рециркуляції для теплонасосних сушарок зерна є підтримання відповідного коефіцієнта рециркуляції [8], який є визначальним для певного режиму сушарки [4].

Відомо, що існують додаткові способи подальшого підвищення енергоефективності рециркуляційних теплонасосних схем сушіння різних матеріалів. До таких способів належить застосування схем з частковим байпасуванням теплового насоса, а також схем з байпасуванням тільки випарника ТН. При частковому байпасуванні ТН певна частка рециркуляційного потоку СА подається повз ТН безпосередньо в сушильну камеру або в камеру змішування. Байпасування ТН дозволяє суттєво скоротити об'ємні потоки СА через ТН і, таким чином, уникати розвинутих поверхонь теплообміну і громіздких габаритів теплообмінників. Проведені в роботах [2-4,8] дослідження таких схем підтверджують значне підвищення їх енергетичної ефективності. Однак, відомі результати були отримані для інших умов роботи теплонасосних схем. Наприклад, в роботі [8] досліджувались теплонасосні схеми сушіння деревини, а конструкції сушарок передбачали використання камерних установок. Таким чином, результати дослідження були отримані для умов реалізації теоретичного (ізоентальпійного) процесу сушіння деревини. В сушильних камерах проточних сушарок зерна реалізуються неізоентальпійні процеси сушіння внаслідок того, що теплота СА витрачається не тільки на процес випаровування вологи, а і на нагрів потоку зерна. Зазначені відмінності умов процесів сушіння разом з особливостями технологічних параметрів сушіння визначають необхідність проведення спеціальних досліджень щодо впливу байпасування ТН на енергоефективність проточних теплонасосних сушарок зерна.

Слід також зауважити, що будь-який спосіб підвищення енергетичної ефективності забезпечує зниження вуглецевого сліду, так рециркуляція СА в традиційних сушарках забезпечує до

20-25% зниження викидів парникових газів [10]. Використання теплового насоса з його частковим байпасуванням, як зовнішнього джерела енергії проточної сушарки, очікувано має значну перспективу досягнення значних позитивних екологічних показників.

У даній роботі проточна теплонасосна зерносушарка з частковим байпасуванням теплового насоса розглядається як єдина термодинамічна система. Метою дослідження є встановлення впливу байпасування на енергетичні показники процесу сушіння та формування науково обґрунтованих підходів до вибору раціональних режимів роботи таких установок. Отримані результати створюють теоретичну основу для подальшої оптимізації проточних теплонасосних сушильних систем у практиці промислового сушіння зерна.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є кількісний аналітичний аналіз впливу часткового байпасування сушильного агента повз тепловий насос на підвищення енергоефективності проточних теплонасосних сушарок зерна на основі розробленої термодинамічної моделі. Основним завданням є формування замкнутої системи аналітичних виразів, що описують тепло- та масообмін в циклі сушарки, проведення на їх основі чисельних розрахунків для оцінки впливу цього технічного рішення на енергетичну ефективність сушарки в межах робочого діапазону зміни технологічних параметрів сушіння. Об'єктом дослідження є схемне рішення теплонасосної сушарки проточного типу, що використовує тепловий насос в лінії рециркуляції сушильного агента з його частковим байпасуванням.

Виклад основного матеріалу. Схема проточної теплонасосної сушарки зерна з частковим бай-

пасуванням теплового насоса в лінії рециркуляції сушильного агента, яка є об'єктом дослідження, представлена на рис. 1.

Енергоефективність сушарок зернових можна оцінити за допомогою коефіцієнта використання затраченої енергії (КВЕ) на видалення вологи, який якісно відображає ефективність використання підведеної енергії [2-4, 8]. Для теплонасосної сушарки відношення корисно витраченої енергії до підведеної енергії приводу теплового насоса описується як

$$\eta_{cy} = \frac{Q_{вип}}{L_{TH}}, \quad (1)$$

де $Q_{вип}$ – тепловий потік, що витрачається безпосередньо на випаровування вологи, кВт; L_{TH} – потужність приводу компресора теплового насоса, кВт.

Тепловий потік, який витрачається безпосередньо на випаровування вологи, визначається однаково для всіх типів сушарок і не залежить від їх конструктивних особливостей [4]

$$Q_{вип} = m_{вол} r(t_m) = G_{заг} \Delta d_{ск} r(t_m), \quad (2)$$

де $m_{вол}$ – вихід вологи з зерна, кг_{вл}/с; $G_{заг}$ – масовий потік СА через сушильну камеру, кг_{са}/с; $\Delta d_{ск}$ – приріст вологовмісту сушильного агента в сушильній камері, кг_{вл}/кг_{са}; $r(t_m)$ – питома теплота випаровування вологи при температурі мокрого термометра, кДж/кг_{вл}.

Підведена потужність до приводу теплового насоса описується співвідношенням [4]

$$L_{TH} = \frac{Q_{TH}^{вип}}{\epsilon_{TH} - 1}, \quad (3)$$

де $Q_{TH}^{вип}$ – теплове навантаження випарника теплового насоса, кВт; ϵ_{TH} – коефіцієнт трансформації теплоти теплового насоса.

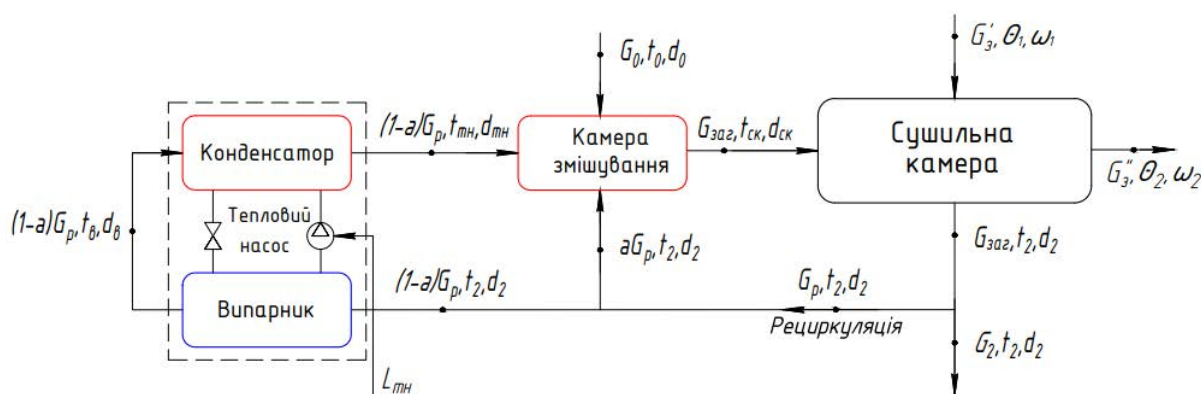


Рис. 1. Схема проточної теплонасосної сушарки з рециркуляцією сушильного агента та частковим байпасуванням теплового насоса

Теплове навантаження випарника теплового насоса, що встановлений на лінії рециркуляції СА та має часткове байпасування, можливо описати як

$$Q_{\text{ТН}}^{\text{вип}} = (1-a)G_{\text{рец}}(h_2 - h_b), \quad (4)$$

де a – коефіцієнт байпасування; $(1-a)$ – коефіцієнт, що визначає частину СА з лінії рециркуляції, який проходить через тепловий насос; $G_{\text{рец}}$ – масовий потік рециркуляції СА, кг₂/с; h_2 – ентальпія відпрацьованого сушильного агента на вході до випарника теплового насоса, кДж/кг_{са}; h_b – ентальпія цього ж сушильного агента на виході з випарника теплового насоса, кДж/кг_{са}.

Байпасування теплового насоса в циклі сушарки описується коефіцієнтом, який є величиною заданою і може теоретично складати від 0 до 1. Таким чином, масова витрата СА через тепловий насос описується виразом

$$G_{\text{ТН}} = (1-a)G_{\text{рец}}. \quad (5)$$

Ентальпія сушильного агента на виході з сушильної камери для проточних сушарок описана в роботі [2] та враховує неізоентальпійність процесу сушіння в сушильній камері

$$h_2 = h_{\text{ск}} - \frac{\Delta d_{\text{ск}}}{\Delta \omega} c_s (\theta_2 - \theta_1), \quad (6)$$

де $h_{\text{ск}}$ – ентальпія сушильного агента на вході в сушильну камеру, яка визначається регламентованими параметрами технологічного процесу сушіння, кДж/кг; $\Delta \omega$ – зміна вологості зерна в процесі сушіння, у долях одиниці; θ_1 і θ_2 – температури зерна на вході та виході з сушильної камери відповідно, °С.

Ентальпію сушильного агента на виході з випарника теплового насоса можна визначити з теплового балансу ТН [2]

$$h_b = h_2 \varepsilon_{\text{ТН}} - h_{\text{ТН}} (\varepsilon_{\text{ТН}} - 1), \quad (7)$$

де $h_{\text{ТН}}$ – ентальпія сушильного агента на виході з конденсатора теплового насоса, кДж/кг; $\varepsilon_{\text{ТН}}$ – коефіцієнт трансформації теплового насоса.

Ентальпія СА на виході з теплового насоса $h_{\text{ТН}}$ визначається за тепловим балансом камери змішування і має вигляд

$$h_{\text{ТН}} = \frac{h_{\text{ск}} - (1-K)h_0 - ah_2}{(1-a)K}, \quad (8)$$

де $h_{\text{ск}}$ – ентальпія сушильного агента на вході в СК; K – коефіцієнт рециркуляції сушильного агента, який можна визначити з теплового балансу сушарки; h_0 – ентальпія свіжого повітря, що підмішується ззовні.

Залежності та алгоритм отримання виразів (6) та (7) детально описано в роботі [2] щодо енер-

гетичної ефективності проточних теплонасосних сушарок зерна. Вираз (8) на відміну від раніше описаних залежностей враховує байпасування теплового насоса в циклі сушарки.

Для розрахунку коефіцієнта трансформації теплоти ТН з урахуванням реальних умов його роботи необхідно врахувати внутрішній коефіцієнт корисної дії та термічні необоротності при теплообміні в конденсаторі Δt_k і випарнику Δt_b теплового насоса [4]. Для врахування однакових умов роботи та адекватного співставлення результатів дослідження значення температурного напору для повітря–повітряних теплових насосів прийнято аналогічно до праць [2-4] та досягає $\Delta t_b = \Delta t_{\text{ТН}} = 10$ °С, а ККД коливається у діапазоні $\eta_{\text{ТН}} = 0,5 - 0,75$ [2]. З урахуванням вище зазначеного коефіцієнт трансформації теплоти реального ТН можна визначити як

$$\varepsilon_{\text{ТН}}^{\text{р}} = \frac{1}{1 - \frac{273 + (t_b - \Delta t_b)}{273 + (t_{\text{ТН}} + \Delta t_k)}} \square_{\text{ТН}}. \quad (9)$$

Значення температур t_b і $t_{\text{ТН}}$ після випарника і конденсатора ТН визначаються через відповідні ентальпії та детально описано в працях щодо оцінки термодинамічної ефективності теплонасосних сушарок зерна [11].

Вологовміст на виході із ТН $d_b = d_{\text{ТН}}$ визначається із матеріального балансу камери змішування відповідно до умов забезпечення необхідного вологовмісту на вході в сушильну камеру

$$d_{\text{ТН}} = \frac{d_{\text{ск}} - (1-K)d_0 - ad_2}{(1-a)K}. \quad (10)$$

У виразах (8) та (10) присутній коефіцієнт рециркуляції, який являє собою відношення $K = G_{\text{рец}} / G_{\text{заг}}$ і може бути визначений із теплового балансу сушарки [4]. Згідно з технологічною схемою проточної сушарки з частковим байпасування теплового насоса на рис. 1 маємо

$$Q_1^3 + Q_0 + L_{\text{ТН}} = Q_2 + Q_2^3 + Q_d, \quad (11)$$

де Q_1^3 – теплота, що вноситься в камеру сушіння з зерном;

Q_2^3 – теплота, що видаляється з камери сушіння з висушеним і нагрітим зерном;

Q_0 – теплота, що вноситься з зовнішнім повітрям; $L_{\text{ТН}}$ – електрична енергія, яка підводиться до приводу теплового насоса;

Q_d – витрата теплоти з конденсатом, що видаляється з випарника ТН (даною величиною будемо нехтувати);

Q_2 – теплота, що видаляється з сушарки з відпрацьованим сушильним агентом.

З урахуванням виразів для складових теплового балансу із рівняння (11) отримуємо вираз для коефіцієнта рециркуляції

$$K = \frac{(h_2 - h_0) + \frac{\Delta d_{\text{СК}}}{\Delta \omega} c_s (\theta_2 - \theta_1)}{(h_2 - h_0) + \frac{(1-a)(h_2 - h_g)}{(\varepsilon_{\text{мн}} - 1)}}. \quad (12)$$

В межах формування моделі процесу роботи сушильної установки параметри робочого середовища в контрольних перерізах та величина рециркуляції визначаються з урахуванням масообмінних змін, що відбуваються в сушильній камері, а саме зміни вологовмісту СА в сушильній камері. Саме приріст вологовмісту $\Delta d_{\text{СК}}$ СА з урахуванням видалення зерна з СК відповідає реальним неізоентальпійним умовам протікання процесу. Обчислення відповідних параметрів СА реалізується шляхом ітераційного розв'язання окремої системи рівнянь, наведеної в дослідженнях, присвячених підвищенню енергетичної ефективності проточних зерносушильних установок [2,11].

Методологія виконання чисельного аналізу енергетичної ефективності базується на ітераційному рішенні системи рівнянь (2) – (12) з урахуванням залежностей та підходів, що описані в працях щодо оцінки енергетичної ефективності звичайних проточних сушарок [2,4,11]. Як результат обчислення системи рівнянь є визначення всіх параметрів системи та можливість розрахунку безпосередньо коефіцієнта використання енергії на видалення вологи з зерна, що характеризує енергетичну ефективність сушарок досліджуваного типу. При цьому з рівнянь (1) – (4) маємо

$$\eta_{\text{cy}} = \frac{r(t_{\text{м}})\Delta d_{\text{СК}}}{K(1-a)(h_2 - h_g)}(\varepsilon_{\text{мн}} - 1). \quad (13)$$

Для визначення оптимальних експлуатаційних характеристик проточних теплонасосних сушильних установок було виконано серію розрахунків за запропонованим вище алгоритмом. Технологічні параметри сушильного агента в сушильній камері регламентуються вимогами сушіння до певного виду зерна та його призначення. Для проточних (конвеєрних та шахтних) сушарок зерна регламентуються основні параметри: вологість та температура сушильного агента на вході в СК, зміна вологості зерна в процесі сушіння, приріст відносної вологості СА в СК.

Виконання даного дослідження, яке враховує байпасування теплового насоса в лінії рециркуляції СА, необхідно привести до співставлення з попередніми дослідження камерних [4] та проточних сушарок без байпасування [2], які було

виконані за аналогічною методологією. Відповідно прийнято аналогічні вихідні умови для виконання розрахунків та проведення чисельного аналізу [2,4]:

- температура сушильного агента на вході в сушильну камеру $t_{\text{СК}} = 45 - 65^\circ\text{C}$ [12];

- відносна вологість СА на вході в сушильну камеру прийнято $\phi_{\text{СК}} = 30\%$ [4], оскільки в межах статті [2] показано, що вологість СА для проточної сушарки майже не впливає на енергетичну ефективність ТНСУ;

- перепад температури СА між входом і виходом з сушильної камери $\Delta t_{\text{СК}} = 5 - 15^\circ\text{C}$ [5];

- зміна вологості зерна в процесі сушіння (інтенсивність сушіння) $\Delta \omega = 6 - 12\%$ [7];

- параметри оточуючого середовища: $t_0 = 10^\circ\text{C}$ та $\phi_0 = 70\%$;

- ККД теплового насоса прийнято для адекватного співставлення з іншими дослідженнями на рівні $\eta_{\text{тн}} = 0,7$;

- процес сушіння стаціонарний.

Для будь яких процесів з сушіння є вкрай важливі показники ентальпії СА в певних точках процесу, оскільки враховує його тепловолігні характеристики. Для стаціонарного режиму роботи теплового насоса в циклі проточної сушарки значення ентальпії СА на виході з випарника (7) та виході з конденсатора (8) наведені на рис. 2.

Із графіків видно, що при зростанні параметру байпасування різниця ентальпій сушильного агента зростає, що говорить про збільшення навантаження на тепловий насос. Також очевидним є те, що при байпасуванні теплового насоса потребується значно більший перегрів СА на виході з теплового насоса при меншій його вологості, а це призведе до збільшення витрати енергії на його привід. Зростання інтенсивності сушіння зерна $\Delta \omega$ покращує роботу теплонасосної сушарки, однак накладає обмеження на роботоздатність системи, що видно з графіків для $\Delta \omega = 12\%$.

Складні тепловолігні процеси в межах теплонасосної сушарки залежать від ефективності теплового насоса і накладають свої обмеження на роботу циклу. Так на рис. 3 представлені залежності для коефіцієнта трансформації ТН від параметру байпасування $1/(1-a)$, перепадів температур $\Delta t_{\text{СК}}$ СА між входом та виходом з СК і інтенсивності процесу сушіння $\Delta \omega$, що ілюструють погіршення умов роботи ТН зі збільшенням параметру байпасування. Це обумовлено більш значним перегрівом СА на виході з теплового насоса та значно більшим його осушенням на виході з випарника теплового насоса.

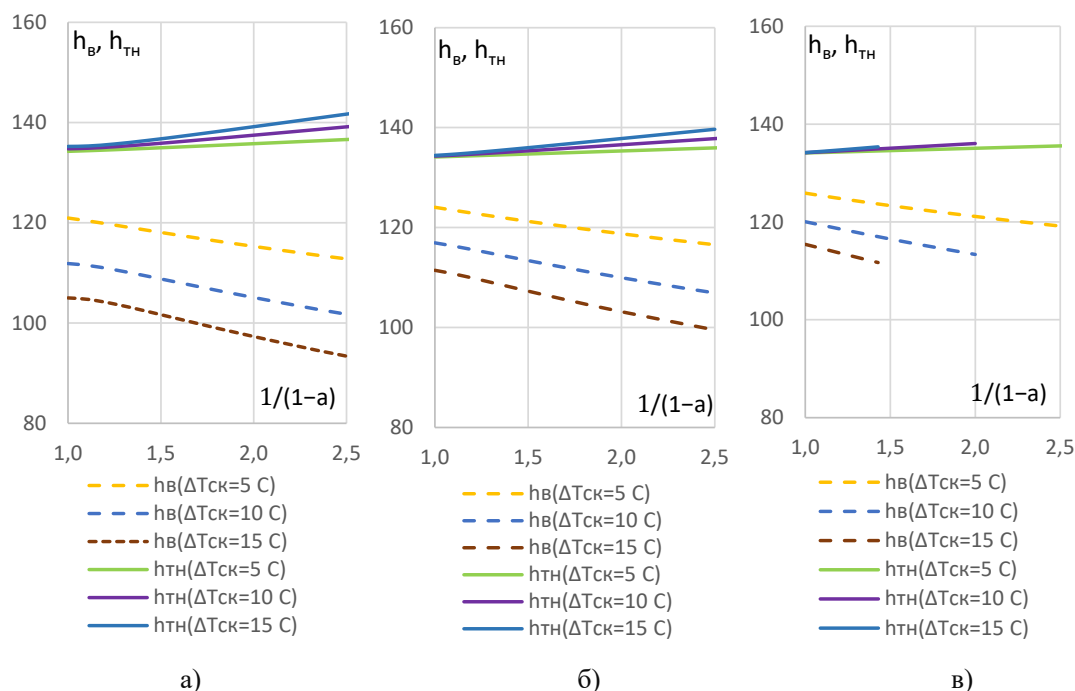


Рис. 2. Ентальпія СА на виході з випарника та конденсатора теплового насоса в залежності від параметру байпасування $1/(1-a)$ при температурі СА 55 °С для різних значень перепаду температури СА в сушильній камері та $\Delta\omega$: а) 6%; б) 9%; в) 12%

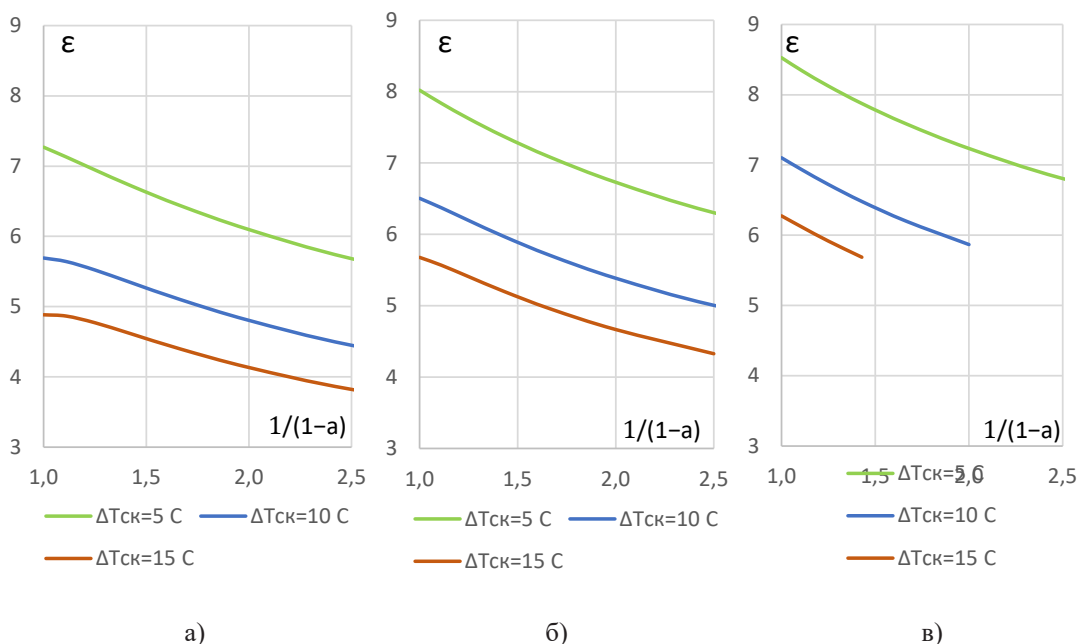


Рис. 3. Коефіцієнт трансформації теплового насоса ТНСУ в залежності від параметру байпасування при температурі СА 55 °С для різних значень перепаду температури СА в сушильній камері та $\Delta\omega$: а) 6%; б) 9%; в) 12%

На рис. 4 представлені результати розрахунків для коефіцієнта рециркуляції в залежності від технологічних параметрів сушіння $\Delta t_{ск}$, $\Delta\omega$ при однаковій температурі СА на вході в СК 55 °С. Із графіків видно, що коефіцієнт рециркуляції

досягає максимального значення $K = 1$, що свідчить про досягнення граничних умов, при яких настає режим повної рециркуляції СА і відсутність втрат енергії в навколишнє середовище з відпрацюва-

ним сушильним агентом. При цьому надлишкова енергія, яка вводиться в сушильний цикл за рахунок енергії приводу ТН, повністю виводиться з циклу з теплою нагріву зерна. Як видно з графіків, цей граничний режим відповідає граничним значенням параметра байпасування $1/(1-a) = 1,5 \dots 2,0$ або коефіцієнта байпасування $a = 0,35 \dots 0,5$.

При зростанні частки байпасування теплового насоса коефіцієнт рециркуляції досягає плато при $1/(1-a) = 2$, що відповідає коефіцієнту байпасування $a = 0,5$.

Розрахунковий аналіз виконаний за описаною моделлю дозволяє за виразом (13) визначити кое-

фіцієнт використання зовнішньої енергії на випаровування вологи для ТНСУ з частковим байпасуванням теплового насоса. Відповідні графіки в залежності від параметру байпасування ТН при різних значеннях $\Delta t_{\text{ск}}$ і $\Delta \omega$ наведені на рис. 5.

Результати моделювання показують, що при зростанні коефіцієнта байпасування енергетична ефективність ТНСУ зростає особливо для низьких значень $\Delta \omega$ та високих перепадах $\Delta t_{\text{ск}}$, що обумовлено зростанням коефіцієнта рециркуляції сушильного агента в циклі сушарки. При значеннях параметру байпасування 2 ($a=0,5$) та вище для всіх режимів роботи ефективність ТНСУ стає

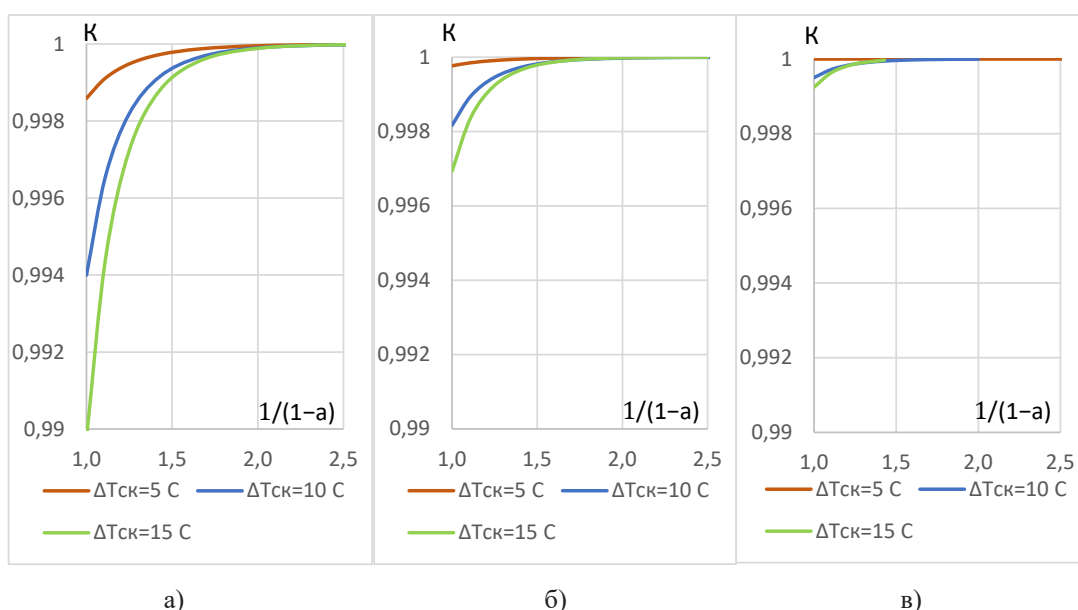


Рис. 4. Коефіцієнт рециркуляції СА ТНСУ в залежності від параметру байпасування при температурі СА 55 °С для різних значень перепаду температури СА в сушильній камері та $\Delta \omega$: а) 6%; б) 9%; в) 12%

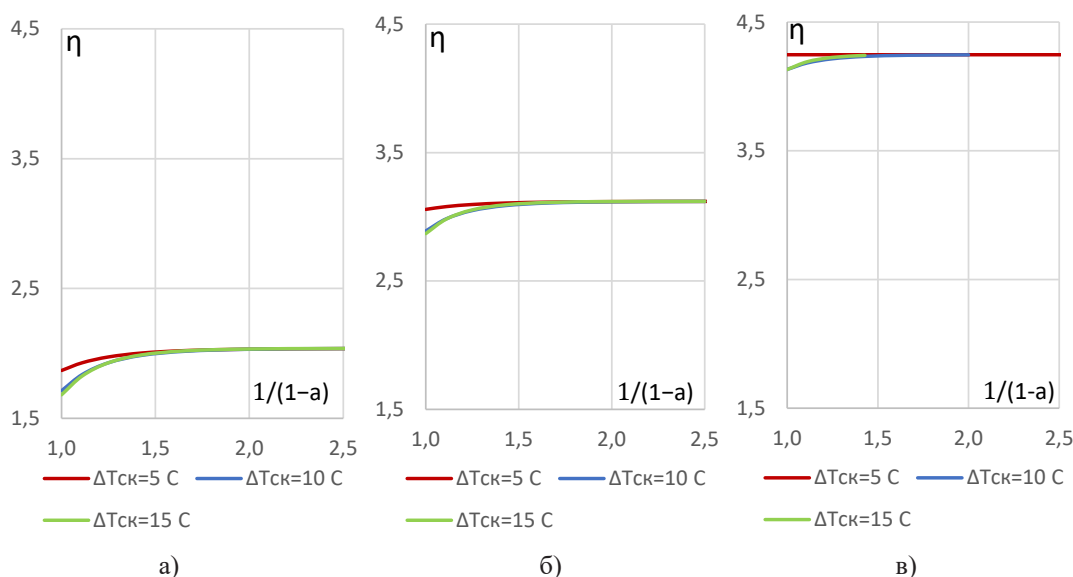


Рис. 5. Коефіцієнт використання енергії ТНСУ в залежності від параметру байпасування при температурі СА 55 °С для різних значень перепаду температури СА в сушильній камері та $\Delta \omega$: а) 6%; б) 9%; в) 12%

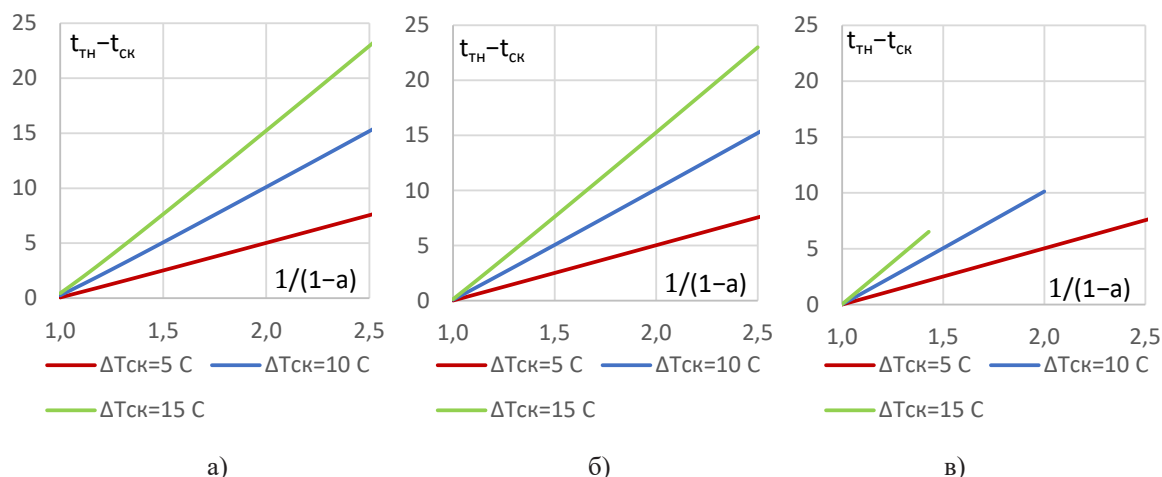


Рис. 6. Значення перегріву СА в конденсаторі теплового насоса ТНСУ в залежності від параметру байпасування при температурі СА 55 °С для різних значень перепаду температури СА в сушильній камері та $\Delta\omega$: а) 6%; б) 9%; в) 12%

майже ідентичною та виходить на плато, коли підвищення коефіцієнта байпасування теплового насоса вже не має сенсу для зростання ефективності. Це свідчить про те, що за цих умов досягається повне використання енергії приводу ТН в сушильному процесі і, відповідно відсутність втрат енергії в навколишнє середовище з відпрацьованим сушильним агентом.

Однак, при проєктуванні сушарок необхідно врахувати ту обставину, що підвищення енергетичної ефективності за рахунок збільшення коефіцієнта байпасування потребує значного перегріву СА в конденсаторі ТН. Даний перегрів обумовлений необхідністю підтримувати задані параметри СА на вході в сушильну камеру при меншій кількості СА, що проходить тепловолісну обробку в ТН. Залежності для перегріву СА в конденсаторі ТН наведені на рис. 6.

Як видно з графіків на рис. 2-6 присутнє обмеження роботи робочого циклу ТНСУ з байпасуванням сушильного агента повз тепловий насос при зростанні інтенсивності сушіння $\Delta\omega$, що обумовлено умовами технологічних параметрів циклу сушарки. Таким чином, в процесі подальших досліджень та проєктуванні робочих сушарок необхідно оптимізувати конструкцію сушарки під певні технологічні параметри $\Delta\omega$, Δt_{ck} , t_{ck} . При цьому необхідно звернути увагу на те, що при зростанні коефіцієнта байпасування значно зростає перегрів СА в конденсаторі ТН, що потребує погодження параметрів сушіння з номінальними параметрами ТН.

Наведені вище графічні залежності побудовані при постійній температурі СА на вході в СК $t_{ck} = 55^\circ\text{C}$. Аналогічні розрахунки були виконані при інших значеннях температури t_{ck} . На рис. 7 наведе-

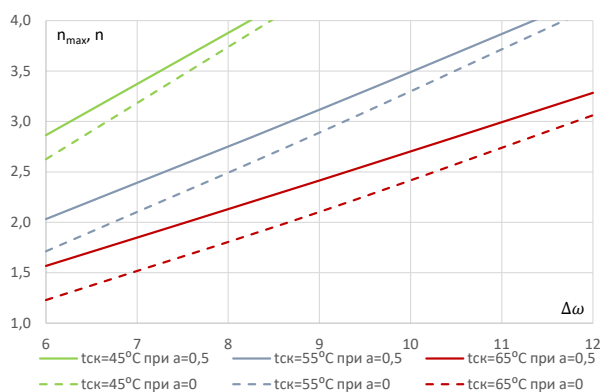


Рис. 7. Значення максимального значення КВЕ n_{max} ТНСУ при $a=0,5$ та КВЕ для ТНСУ без байпасування ТН ($a=0$) в залежності від $\Delta\omega$

дено залежності максимального коефіцієнта використання енергії на видалення вологи зерна для різних температур сушіння, який досягається при збільшенні коефіцієнта байпасування до значення $a=0,5$ для всіх режимів роботи сушарки. Для співставлення штриховими лініями нанесені відповідні залежності для ТНСУ без байпасування ТН [2].

Графіки на рис. 7 демонструють вплив байпасування теплового насоса ТНСУ на енергетичну ефективність для різних температурних режимів сушіння зерна при зміні інтенсивності сушіння $\Delta\omega$. Видно, що приріст ефективності більш значний в зоні низької інтенсивності $\Delta\omega$ та зростає з підвищенням температури сушіння.

Висновки. Організація часткового байпасування теплового насоса в лінії рециркуляції сушильного агента в технологічному циклі теплонасосної сушарки зерна є одним з методів, що заслуговує ретельного розгляду та практичного

впровадження в реальних сушильних установках. В процесі практичного впровадження даного технічного рішення слід врахувати наступні висновки виконаного дослідження:

1. Часткове байпасування теплового насоса суттєво покращує енергетичну ефективність теплонасосної сушарки при низькій інтенсивності сушіння.

2. Граничні значення коефіцієнта байпасування для заданих при аналізі характеристик ТН визначаються технологічними умовами процесу. Його доцільні (граничні) значення лежать у межах $a = 0,35 \dots 0,5$, що забезпечує максимальну енергетичну ефективність сушарки для даного ТН.

3. При граничних значеннях коефіцієнта байпасування коефіцієнт рециркуляції для проточних

установок дорівнює одиниці (наступає режим з повною рециркуляцією), що вказує на максимальне використання в сушильному процесі енергії приводу ТН і, відповідно, відсутність втрат енергії в навколишнє середовище з відпрацьованим сушильним агентом.

4. Під час вибору теплового насоса для схем ТНСУ з байпасуванням необхідно враховувати допустимі значення температури СА на виході з конденсатора ТН і погоджувати їх з необхідними розрахунковими значеннями для заданих технологічних параметрів сушильного процесу.

5. Отримані результати досліджень можуть слугувати основою для практичної реалізації проточних теплонасосних сушарок зерна з байпасуванням теплового насоса.

Список літератури:

1. Jimoh K.A., Hashim N., Shamsudin R., Che Man H., Jahari M., Onwude D.I. Recent advances in the drying process of grains. *Food Engineering Reviews*. 2023. Vol. 15. P. 548–576. DOI: 10.1007/s12393-023-09333-7.
2. Безродний М.К., Вовк В.В. Енергетична ефективність проточних теплонасосних сушарок зерна. *Енергетика і автоматика*. 2025. №3(79). С. 125-142. DOI: 10.31548/energiya3(79).2025.125.
3. Безродний М.К., Кутра Д.С., Вовк В.В. Термодинамічний аналіз теплонасосних сушильних установок для сушіння зерна. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць*. 2012. Вип. 4. С. 27-40. URL: https://nmetau.edu.ua/file/ttpt_2012_full.pdf.
4. Безродний М.К., Припула Н.О., Вовк В.В. Теплонасосні установки сушіння зерна. Базові методи підвищення ефективності процесів сушіння зернових. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. №2. С. 42-54. DOI: 10.33070/etars.2.2025.04.
5. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В. М., Петрова Ж. О., Чалаєв Д. М. Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна. Київ, 2012. 154 с.
6. Li Jin Goh, Mohd Yusof Othman, Sohif Mat, Hafidz Ruslan, Kamaruzzaman Sopian. Review of heat pump systems for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, Issue 9. P. 4788-4796. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.072.
7. Шаповаленко О.І., Євтушенко О.О., Рибчинський Р.С. Сушіння та зберігання зерна: підручник. Херсон, 2019. 396 с.
8. Безродний М. К., Кутра Д.С. Ефективність застосування теплових насосів у установках сушіння деревини. Київ, 2011. 240 с.
9. Безродний М.К., Пуховий І.І., Кутра Д.С. Теплові насоси та їх використання. Київ, 2013. 312 с.
10. Amantéa, R. P., Fortes, M., & Santos, G. T. Exergy analysis applied to the design of grain dryers with air flow recirculation. *ASABE Annual International Meeting: ASABE meeting paper* (Dallas, Texas July 29 – August 1, 2012). Dallas, Texas, USA. ASABE Paper No. 12-1340983.
11. Безродний М.К., Вовк В.В. Вплив використання сонячної енергії на енергоефективність проточних теплонасосних сушарок зерна. *Енергетика і автоматика*. 2025. №6(82), С. 19-40. DOI: 10.31548/energiya6(82). 2025.019.
12. Paziuk V.M., Liubin M.V., Yaropud V.M., Tokarchuk O.A., Tokarchuk D.M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 56, No. 3 / 2018. P. 39–48.

Bezrodnyi M. K., Vovk V. V. THE IMPACT OF HEAT PUMP BYPASSING ON THE ENERGY EFFICIENCY OF CONTINUOUS-FLOW HEAT PUMP GRAIN DRYERS

Optimization of circuit configurations for grain drying processes to enhance energy efficiency and reduce the carbon footprint is a vital scientific pursuit, particularly when employing high-cost technologies such as heat pumps. This article outlines the prerequisites of the study and proposes a method for improving the energy efficiency of heat-pump-assisted recirculating flow grain dryers through the partial bypassing of the recirculating drying agent around the heat pump. A mathematical model is presented, developed based on a thermodynamic analysis of the proposed heat pump dryer configuration. The initial conditions for numerical analysis are provided, enabling a comparative evaluation with previous and related studies. The research

findings are illustrated graphically for the key determining variables: the heat pump's coefficient of performance (COP), the recirculation coefficient, and the energy utilization coefficient for moisture removal from the grain. The study identifies limitations regarding the use of specific heat pumps, based on the necessity of drying agent superheating in the condenser as a function of the bypass coefficient. Furthermore, the dependence of the maximum energy utilization coefficient for moisture removal across various drying temperatures is described. It is demonstrated that this maximum is achieved by increasing the bypass coefficient for all dryer operating modes. A comparative analysis is performed against the results for flow heat pump dryers without partial bypassing of the recirculating drying agent. These research results can serve as a foundation for the practical implementation of heat pump grain dryers featuring bypass systems or for further applied and scientific research, accounting for the specific features of the described steady-state mathematical model for grain drying.

Keywords: grain dryer, energy efficiency, recirculation, heat pump, continuous-flow dryers, bypassing.

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Боженко М.Ф.

<https://orcid.org/0000-0003-2649-0901>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИКА ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ В КОТЕЛЬНЯХ ПРИ ЗВОЛОЖЕННІ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ

Стаття присвячена підвищенню енергетичної ефективності котельного устаткування на промислових ТЕЦ та в котельнях систем централізованого та помірно-централізованого теплопостачання, що працюють на природному газі. Відомо, що температура димових газів на виході багатьох парових і водогрійних котлів перевищує 140°C , що призводить до збільшених втрат потоків теплоти з відхідними димовими газами, а, відповідно, і до зменшення ККД цих агрегатів. Застосування утилізаційних установок димових газів для глибокого охолодження продуктів згоряння нижче температури точки роси підвищить їх ефективність за рахунок збільшення ККД котла і зменшення споживання природного газу. Для цих цілей можуть бути використані контактні або поверхневі теплообмінники. Актуальними на сьогоднішній день є впровадження в паливоспалюючих установках заходів щодо зменшення шкідливих для навколишнього середовища викидів оксидів азоту. Одним із ефективних методів зниження оксидів азоту є зволоження дуттьового повітря, наприклад, у контактних повітрянагрівачах. Окрім цього, зволоження дуттьового повітря сприяє збільшенню потоків відведеної теплоти в утилізаторах за рахунок підвищення ентальпії димових газів на вході до них. Для однієї зі схем комплексної утилізації теплоти димових газів котельень розроблена методика вибору набірних теплоутилізаційних установок (ТУ) з типових поверхневих калориферів при зволоженні дуттьового повітря і глибокому охолодженні димових газів. Такі ТУ доцільно експлуатувати при наявності споживачів з низькою температурою води при оптимальній температурі димових газів на виході $t_r^* = 20 - 30^{\circ}\text{C}$. Після визначення максимального потоку відведеної від димових газів теплоти, який більше приблизно у 3 рази ніж для «сухого» режиму роботи ТУ і у 1,3 рази – ніж при глибокому охолодженні димових газів без зволоження дуттьового повітря, обчислюють можливу витрату потоків води. В розрахунках площі теплопередавальної поверхні ТУ і виборі кількості та схеми розміщення калориферів при визначенні коефіцієнта теплопередачі на зовнішній поверхні трубок враховується їх зрошення конденсатом водяних парів з димових газів. В схемі утилізації також розроблена методика вибору контактних повітрянагрівачів (КПН) з типових конструкцій декарбонізаторів для зволоження та нагрівання дуттьового повітря, що надходить на спалювання природного газу в котлах. Результатом розрахунків за цією методикою є визначення внутрішнього діаметра колони та висоти шару насадки з керамічних кілець Рашига розмірами $25 \times 25 \times 3$ мм.

Ключові слова: котельня, природний газ, димові гази, температура, вологовміст, теплоутилізаційна установка, потоки теплоти, дуттьове повітря, зволоження, вода.

Постановка проблеми. В Україні для теплопостачання житлових, громадських та виробничих будівель широко використовуються котельні з водогрійними та паровими котлоагрегатами, підвищення ефективності яких може бути досягнуто і за рахунок зменшення температури відхідних димових газів. Встановлюючи за такими котлоагрегатами при спалюванні в них природного газу теплоутилізаційні установки (ТУ) досягається підвищення ККД, а потоки утилізованої теплоти

можуть бути корисно використані або в циклі котельні, або для нагрівання води зовнішніх споживачів. Відомо, що ТУ можуть експлуатуватися в режимах, коли від димових газів відводяться тільки потоки «явної» теплоти або і «явної» та «прихованої». Другий режим експлуатації, як показали теоретичні та практичні дослідження, з енергетичної точки зору є більш ефективним.

Захист довкілля від шкідливих викидів, що містяться в димових газах, зокрема, оксидів азоту,

є також важливим фактором при експлуатації котелень. А цю проблему можна вирішувати при зволоженні дуттьового повітря, яке подається на спалювання природного газу в котлах. Окрім зменшення викидів оксидів азоту при зволоженні дуттьового повітря також підвищується і енергетична ефективність ТУ за рахунок збільшення ентальпії продуктів згоряння, які надходять в утилізатори.

В навчальному посібнику [1, с. 9; с. 29 – 43] з посиланням на відповідні літературні джерела описані типові ТУ, які використовуються для утилізації теплоти відхідних димових газів парових і водогрійних котлів:

- поверхневі утилізатори-калорифери, що експлуатуються у так званому «сухому» режимі;
- блочні контактні економайзери типу ЕК-БМ;
- автономний контактний-поверхневий економайзер АЕМ-0,6;
- контактний теплообмінний апарат з активною насадкою (КТАН-утилізатор);
- контактний повітропідігрівач з активною насадкою (КТАН-повітропідігрівач);
- комплексна екологічно чиста теплоутилізаційна установка контактного типу (ЕКТ) з контактним теплоутилізатором (КТУ) і контактним повітропідігрівачем (КПН).

В попередніх публікаціях були проаналізовані роботи [2 – 4], де розглянуті сучасні підходи до застосування теплоутилізаційного обладнання в теплових схемах ТЕЦ і котелень. Авторами цих робіт були запропоновані комплексні теплоутилізаційні установки з підігріванням та зволоженням дуттьового повітря і нагріванням води різних потреб (зворотньої з теплових мереж, хімічно очищеної, технологічних споживачів, гарячого водопостачання тощо).

При виборі типу теплоутилізаційних установок слід також враховувати і необхідність захисту газового тракту котлів після них та димових труб. Мова йде про виключення конденсації водяних парів з димових газів при їх глибокому охолодженні нижче температури точки роси в цих елементах. Автори роботи [5, с. 125] з посиланням на попередні публікації виділяють методи запобігання конденсації, які, зокрема, пов'язані зі зміною вологості димових газів: байпасування частини димових газів поза ТУ, підмішування до димових газів після ТУ нагрітого в повітронагрівачі котла повітря, підсушування цих газів у спеціальних теплообмінниках-газопідігрівачах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В попередніх публікаціях за участі автора [6 – 12]

наведені результати розрахункових досліджень енергетичної та екологічної ефективності утилізаторів-калориферів при встановленні їх за паровими та водогрійними котлами котелень. Як показав аналіз дослідження порівняльної ефективності поверхневих та контактних ТУ поверхневі утилізатори є найефективнішими з економічної точки зору за меншою величиною зведених витрат [6, 10]. Для запобігання конденсації водяних парів в газовому тракті і в димовій трубі був обраний метод байпасування частини димових газів в обхід калориферів.

Розрахунки енергетичної ефективності поверхневих утилізаторів-калориферів, що встановлені в опалювальній котельні за водогрійними котлами типу КВ-ГМ, при їх експлуатації в «сухому» та «мокрому» режимах (каскадна утилізація), наведені в роботі [7, с. 87]. При експлуатації калориферів в «сухому» режимі температура димових газів на виході з них становила 60 °С. Для так званого «мокрого» режиму роботи калориферів була визначена мінімальна температура димових газів на виході, що становила 19 – 24 °С, а оптимальне значення коефіцієнта байпасування для цих температур – 0,22 – 0,32. За рахунок глибокого охолодження димових газів при використанні каскадної калориферної установки порівняно з експлуатацією її в «сухому режимі» для котельні з трьома водогрійними котлами КВ-ГМ-10 за опалювальний сезон можливо досягти збільшення кількості утилізованої теплоти біля 22 тис. ГДж/рік.

Загальний максимальний потік відведеної в калориферних установках теплоти при глибокому охолодженні димових газів у разі зволоження дуттьового повітря для водогрійної котельні з трьома водогрійними котлами КВ-ГМ-10 дорівнює 5826 кВт. Загальна річна кількість утилізованої теплоти складає 42398 ГДж/рік, а її приріст за рахунок зволоження дуттьового повітря 4400 ГДж/рік (біля 10%) [8, с. 56]. Також в роботі отримано, що викидання оксидів азоту з димовими газами при зволоженні дуттьового повітря, яке надходить на газові пальники котлів, зменшується приблизно у 2 рази.

Розрахунково-чисельним методом виконаний аналіз впливу на енергетичну та екологічну ефективність поверхневих утилізаторів температури та вологовмісту зволожуваного повітря, що подається на пальники котлів [9, с. 12-13]. Було показано, що з точки зору практичної реалізації в котельнях більш доцільним є зволоження повітря при температурі 50 °С. Вологовміст повітря при цьому сягатиме 85 г/кг с.п, а димових газів на

вході в утилізатор – 190 г/кг с.г. Оптимальна температура газів на виході з калорифера складатиме 27 – 32 °С, а коефіцієнт байпасування – 0,26 – 0,33. Питома кількість відведеної в калориферах теплоти порівняно з режимом без зволоження повітря може бути збільшена на 28 %, а викиди оксидів азоту з димовими газами в довкілля можуть бути зменшені більше як у 3 рази.

В роботі [10, с. 88] були проаналізовані схеми трьох теплоутилізаційних установок димових газів котельні зі зволоженням дуттьового повітря: з КТАНом-утилізатором – КТАНом-повітронагрівачем, екологічно чиста установка, з поверхневими утилізаторами-калориферами. На основі розроблених методик виконані практичні розрахунки енергетичної і екологічної ефективності ТУ. В результаті порівняння отриманих результатів виявлено, як зазначено вище, що теплоутилізаційна установка з поверхневими калориферами характеризується найвищими показниками енергетичної і екологічної ефективності.

В результаті числових розрахунків [11, с. 36 – 38] отримані узагальнені залежності коефіцієнта байпасування та питомої кількості відведеної від димових газів теплоти у залежності від температури охолоджених димових газів та їх температури на вході в поверхневі утилізатори-калорифери, а також різних значеннях вологовмісту димових газів. Зазначені залежності отримані для трьох режимів роботи утилізаторів: «сухого», при глибокому охолодженні димових газів, при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря. Отримані залежності можуть бути використані в режимі реального часу

для визначення можливої максимальної кількості відведеної теплоти, або для регулювання теплопродуктивності утилізаторів у залежності від необхідного потоку теплоти для нагрівання води зовнішніх споживачів.

Методики вибору набірних теплоутилізаційних установок з типових поверхневих калориферів наведені в роботі [12]. Розрахункова кількість калориферів, режими їх експлуатації («сухий» чи «мокрый») та спосіб розміщення, обумовлюються можливими потоками теплоти відхідних димових газів котлів та необхідним тепловим навантаженням споживачів гарячої води. В результаті числових розрахунків також отримані рівняння для визначення максимально можливих потоків відведеної теплоти при охолодженні димових газів в ТУ [12, с. 112].

Постановка завдання. Метою статті є розробка методик вибору теплоутилізаційного обладнання димових газів в котельнях (набірних теплоутилізаційних установок з типових поверхневих калориферів і типових контактних повітронагрівачів) при зволоженні дуттьового повітря. Режими і параметри експлуатації цього обладнання будуть обумовлюватися можливими потоками теплоти відхідних димових газів котлів та необхідним тепловим навантаженням споживачів гарячої води.

Виклад основного матеріалу. Схема комплексної теплоутилізаційної установки наведена на рис. 1 [9, с. 9].

Згідно з описом схеми [9, с. 9] димові гази з котла 1 надходять в міжтрубний простір теплоутилізатора-калорифера 2, де охолоджуються і осушуються

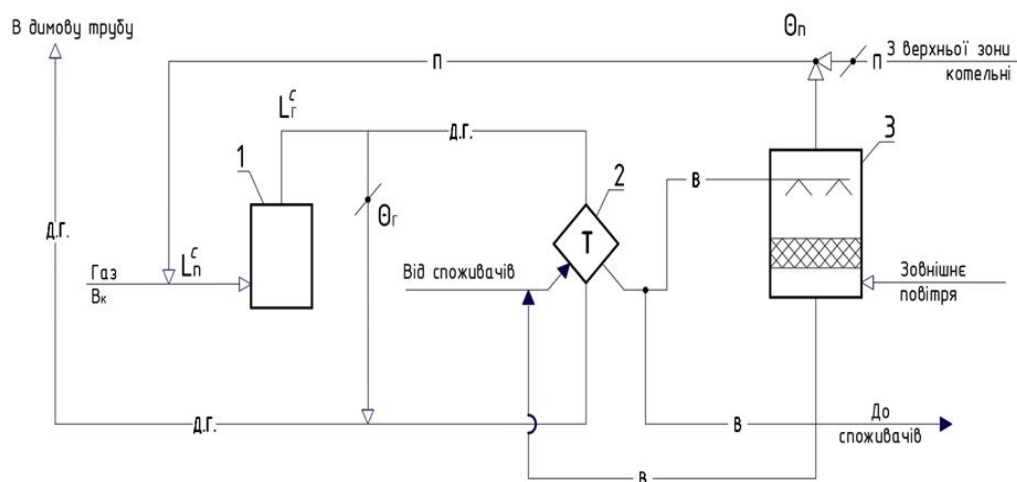


Рис. 1. Схема утилізації теплоти димових газів: 1 – водогрійний котел; 2 – теплоутилізатор-калорифер; 3 – контактний повітронагрівач; -п– повітря; -д.г– димові гази; -в– вода

та спрямовуються в димову трубу. Для запобігання конденсації водяних парів в газовому тракті і димовій трубі частина димових газів, що визначається коефіцієнтом байпасування θ_p , надходить на підмішування до охолоджених димових газів. У

трубах калориферної установки циркулює вода, яка нагрівається і частково надходить на контактний повітрянагрівач та частково – до зовнішніх споживачів, після яких знову спрямовується до калориферної установки. На контактний повітрянагрівач 3 надходить зовнішнє повітря, яке при безпосередньому контакті з водою на насадці, наприклад, з кілець Рашига, нагрівається та зволожується, і спрямовується на газові пальники котлів. Для запобігання випадіння вологи зі зволоженого повітря, відносна вологість якого сягає 95 – 100 %, до нього підмішується повітря з верхньої зони котельні, що характеризується коефіцієнтом байпасування θ_n .

Методика вибору калориферних установок при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря. Як наголошено в роботі [12, с. 108] експлуатація калориферних установок при глибокому охолодженні димових газів доцільна при наявності споживачів з низькою температурою води, що також відноситься і до режиму їх роботи зі зволоженням дуттьового повітря. Для таких ТУ беруть оптимальну температуру димових газів на виході $t''_r = 20 - 30$ °С [12, с. 108] і за формулою (1) [12, с. 108] визначають максимально можливі потоки відведеної теплоти при охолодженні димових газів в ТУ, кВт. На відміну від попереднього дослідження спочатку за рис. 3 або формулою (13) [11, с. 38] визначають умовну кількість відведеної від димових газів теплоти $q'_{к.г}$, кДж/кг, у залежності від t''_r . Надалі за формулою (11) [11, с. 37] обчислюють дійсну питому кількість відведеної від димових газів теплоти $q_{к.г}$, кДж/кг, у залежності від величини $q'_{к.г}$ та температури відхідних димових газів на виході з котла t'_r , за яким встановлена ТУ.

За аналогією з прикладом [12, с. 109], при експлуатації ТУ, яка може бути встановлена за котлом КВ-ГМ-10, при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря, величина $q'_{к.г} = 479$ кДж/кг. Тоді потік відведеної від димових газів теплоти в ТУ складе $Q_k = 2250$ кВт, що більше приблизно у 3 рази ніж для «сухого» режиму роботи ТУ і у 1,3 рази – ніж при глибокому охолодженні димових газів без зволоження дуттьового повітря.

Надалі за рівнянням теплового балансу визначають витрату потоку води, кг/с, що нагрівається в калориферній установці

$$G_{wi} = Q_{ki} / c_w (t''_{wi} - t'_{wi}), \quad (1)$$

де c_w – теплоємність води, кДж/(кг · К), яку можна брати сталою $c_w = 4,19$ кДж/(кг · К); t'_{wi} та t''_{wi} – температури потоку води на виході з ТУ та вході до неї відповідно, °С.

Наступний вибір типу та кількості калориферів в ТУ здійснюється за методикою, яка рекомендована при виборі калориферних установок, що експлуатуються в «мокрому» режимі [12, с. 110 – 111].

Методика вибору контактних повітрянагрівачів. Зауважимо, що контактні повітрянагрівачі (КПН) в системах утилізації теплоти димових газів котелень використовуються не тільки для економії палива за рахунок попереднього підігріву повітря, а і для отримання екологічного ефекту – зменшення викидів оксиду азоту [10, с. 86]. В умовах експлуатації цих апаратів оптимальною температурою нагріву дуттьового повітря, як зазначено вище, є $t''_n = 50$ °С. Досягти таку температуру можливо при подаванні на КПН води з температурою $t'_w = 58$ °С [10, с. 86].

Для схеми утилізації, що розглядається в роботі (див. рис. 1), беремо як КПН типову конструкцію декарбонізатора, що застосовується для видалення розчинних газів з води в схемах водопідготовки ТЕЦ, котелень, або на підприємствах хімічної промисловості з використанням повітря [10, с. 86].

Потік теплоти, що витрачається на нагрівання та зволоження повітря в КПН, кВт, визначається за формулою

$$Q_{кпн} = L_n^c (1 - \theta_n) (h''_n - h'_n), \quad (2)$$

де L_n^c – масова витрата сухого повітря, кг/с; θ_n – коефіцієнт байпасування за повітрям (в розрахунках можна брати $\theta_n = 0,2$); h''_n і h'_n – ентальпії повітря на виході з КПН і на вході до нього відповідно, кДж/кг.

Масова витрата сухого повітря, кг/с

$$L_n^c = \frac{B_k}{3600} \alpha_r V_n^o \rho_{c.n}^o, \quad (3)$$

де B_k – витрата природного газу на спалювання в котлі, м³/год; α_r – коефіцієнт надлишку повітря в топці котла; V_n^o – теоретично необхідний об'єм повітря для спалювання природного газу, м³/м³; $\rho_{c.n}^o$ – густина сухого повітря за нормальними умовами, кг/м³.

Відомо, що величина $\rho_{c.n}^o = 1,293$ кг/м³, за практичними рекомендаціями можна брати $\alpha_r = 1,05$, а для усередненого складу природного газу величина $V_n^o = 9,59$ м³/м³ [9, с. 10], тоді згідно з формулою (3) для визначення масової витрати сухого повітря, кг/с, можна використовувати вираз

$$L_n^c = 3,617 \cdot 10^{-3} \cdot B_n. \quad (4)$$

Ентальпії повітря h_n' і h_n'' , кДж/кг, можна обчислити або за $h-d$ діаграмою, або за відповідними формулами [1, с. 71], при відомих температурах (t_n' , °С) та відносних вологостях (ϕ_n' , %), які визначаються наступним чином:

– на вході в КПН – залежать від населеного пункту: температура t_n' дорівнює середній температурі зовнішнього повітря за опалювальний період $t_{ср.о.}$; відносна вологість ϕ_n' визначається для січня місяця [13, с. 345 – 346];

– на виході з КПН – температура, як зазначено вище, $t_n'' = 50$ °С; відносна вологість $\phi_n'' = 100$ %; тоді для будь-якого населеного пункту величина ентальпії складе $h_n'' = 273,5$ кДж/кг.

Визначають площу поперечного перерізу насадки, m^2

$$f_n = \frac{V_n}{v_n} = \frac{L_n^c (1 - \theta_n) (1 + \frac{\bar{d}_n}{1000})}{v_n \bar{\rho}_n}, \quad (5)$$

де V_n – об'ємна витрата повітря, що нагрівається і зволожується у КПН, m^3/c ; v_n – швидкість повітря в поперечному перерізі насадки КПН, m/c ; $\bar{d}_n$ – середній вологовміст повітря в КПН, $г / кг$ с.п.; $\bar{\rho}_n$ – середня густина повітря в КПН, $кг / m^3$.

Величини $\bar{d}_n$ і $\bar{\rho}_n$ обчислюють за залежностями, що наведені в [1, с. 73], при цьому d_n'' визначається або за $h-d$ діаграмою, або за відповідною формулою [1, с. 71], а $d_n'' = 86,3$ $г / кг$ с. п.; швидкість повітря частіше беруть $v_n = 1,5 - 2$ $м / с$ [1, с. 73].

За отриманою величиною f_n за табл. 1 обирають декарбонізатор з найближчим значенням стандартної площі поперечного перерізу насадки (f_n , m^2) і відповідним внутрішнім діаметром ($D_{вн}$, мм), після чого з рівняння (5) уточнюють дійсну швидкість повітря в насадці (v_n^d , $м / с$).

Таблиця 1

Конструктивні характеристики декарбонізаторів

$D_{вн}$, мм	565	730	1030	1260	1460
f_n , m^2	0,251	0,417	0,833	1,25	1,67
$D_{вн}$, мм	1630	1790	2060	2315	2520
f_n , m^2	2,08	2,50	3,33	4,17	5,00

За рівнянням вигляду (1) визначають витрату нагрівальної води на КПН (G_n , $кг / с$), при цьому беруть визначене за формулою (2) теплове навантаження КПН ($Q_{кпн}$, кВт), а температури нагрівальної води на вході $t_n'' = 58$ °С і на виході – $t_n' = 20$ °С.

Визначають висоту шару насадки в КПН, $м$

$$H_n = \frac{V_n}{f_n} = \frac{Q_{кпн} / q_v}{f_n}, \quad (6)$$

де V_n – об'єм насадки в КПН, m^3 ; q_v – об'ємна теплова напруга насадки, $кВт / m^3$.

У зв'язку з відсутністю експериментальних даних для контактних повітрянагрівачів в практичних розрахунках можна скористатися результатами досліджень насадкових контактних економайзерів Аронова І. З., де величина q_v , $кВт / m^3$, наведена у залежності від густини зрошення насадки водою (g , $m^3 / (m^2 \cdot год)$) та числа Рейнольдса для димових газів (Re_n). Такий підхід з посиленням на відповідне першоджерело був використаний в роботі [10, с. 86].

Густина зрошення g , $m^3 / (m^2 \cdot год)$, і число Рейнольдса для потоку повітря (Re_n) визначаються за наступними залежностями

$$g = \frac{G_n 3600}{f_n \rho_v}; \quad Re_n = \frac{v_n^d d_e}{\nu_n} \quad (7)$$

де ρ_v – густина води, $кг / m^3$, яку в розрахунках можна брати 1000 $кг / m^3$; d_e – еквівалентний діаметр насадки, $м$; ν_n – кінематична в'язкість повітря, $m^2 / с$.

Для керамічних кілець Рашига розмірами $25 \times 25 \times 3$ мм, які є найпоширенішими в декарбонізаторах, величина $d_e = 0,015$ мм, а кінематичну в'язкість повітря, $m^2 / с$, визначають за таблицями фізичних властивостей при середній температурі $t_{ср.п} = 0,5 (t_n' + t_n'')$.

Екстраполяванням експериментальних результатів Аронова І. З. були отримані значення величини q_v для насадкових камер КПН (табл. 2).

Таблиця 2

Орієнтовна об'ємна теплова напруга насадкових камер КПН з кілець Рашига $25 \times 25 \times 3$ мм при $t_n' = 50$ °С, q_v , $кВт / m^3$

Re_n	Густина зрошення g , $m^3 / (m^2 \cdot год)$		
	20 – 30	10 – 20	5 – 10
500	90	90	90
1500	300	300	300

Для проміжних значень числа Re_n величина q_v визначається інтерполяванням.

Наприклад, за одним з котлів КВ-ГМ-10 котельні, що розташована в м. Києві, встановлена ТУ, яка експлуатується в «мокрому» режимі зі зволоженням дуттьового повітря. Вище зазначено, що максимальний потік відведеної від димових газів теплоти в ТУ складає $Q_k = 2250$ кВт. Один або декілька калориферів даної установки буде використаний для нагріву потоку води, що спрямовується на КПН.

При витраті природного газу на котел $B_k = 1260$ $m^3 / год$ [14, с. 79] за виразом (4) визна-

чили витрату сухого повітря на КПП, яка складе $L_n^c = 4,56 \text{ кг/с}$.

Для м. Києва за [13, с. 345] визначили температуру $t_{\text{ср.о}} = -0,1^\circ\text{C}$ та відносну вологість $\varphi_n' = 83\%$, а за $h-d$ – діаграмою – ентальпію повітря на вході в КПП $h_n' = 7,5 \text{ кДж/кг}$. При величині $h_n'' = 273,5 \text{ кДж/кг}$ та $\theta_n = 0,2$, що зазначено вище, за формулою (2) визначили потік теплоти на нагрівання і зволоження повітря в КПП $Q_{\text{кпп}} = 970 \text{ кВт}$.

При температурах нагрівальної води на вході в КПП $t_n'' = 58^\circ\text{C}$ і на виході $t_n' = 20^\circ\text{C}$ за рівнянням вигляду (1) визначили її витрату $G_n = 6,1 \text{ кг/с}$.

При значеннях вологовмісту повітря на вході в КПП $d_n' = 3,3 \text{ г/кг с.п}$ та виході з нього $d_n'' = 86,3 \text{ г/кг с.п}$ за [1, с. 73] визначили величину середнього вологовмісту в КПП $\bar{d}_n = 24,4 \text{ г/кг с.п}$. За [1, с. 73] також визначили середню температуру і середню густину в КПП $\bar{\rho}_n = 1,177 \text{ кг/м}^3$.

Беремо швидкість повітря в поперечному перерізі насадки КПП $v_n = 1,7 \text{ м/с}$ і за формулою (5) визначаємо площу поперечного перерізу насадки КПП $f_n = 1,87 \text{ м}^2$. Найближчому стандартному значенню цієї величини відповідає $f_n = 2,08 \text{ м}^2$ і внутрішній діаметр декарбонізатора $D_{\text{вн}} = 1630 \text{ мм}$ (табл. 1). Уточнена дійсна швидкість повітря в КПП складе $v_n^a = 1,53 \text{ м/с}$.

Для середньої температури повітря в КПП визначили кінематичну в'язкість $\nu_n = 15,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, а за формулами (6) – величини $\text{Re}_n = 1478$ і $g = 10,6 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$. Тоді за табл. 2 визначена величина $q_v = 295 \text{ кВт} / \text{м}^3$, а за формулою (6) – висота шару насадки $H_n = 1,6 \text{ м}$.

Таким чином для нагрівання і зволоження повітря, що надходить на спалювання природного газу водогрійного котла КВ-ГМ-10, обрана колона декарбонізатора внутрішнім діаметром $D_{\text{вн}} = 1630 \text{ мм}$ і висотою шару насадки з керамічних кілець Рашига $H_n = 1,6 \text{ м}$, а загальна її висота може бути $H_k = 2,5 - 3 \text{ м}$.

Висновки. 1) Розглянута комплексна установка для глибокої утилізації теплоти димових газів в котельні та зволоження дуттьового повітря котлів у складі поверхневих калориферів і контактного повітронагрівача.

2) Наведена методика вибору типу та кількості калориферних установок при «мокрому» режимі їх експлуатації, що обумовлюється охолодженням димових газів до оптимальної температури $t_n'' = 20 - 30^\circ\text{C}$ та нагріванням потоків води з низькою температурою.

3) Запропоновано використовувати типові конструкції декарбонізаторів як контактні повітронагрівачі для нагрівання та зволоження дуттьового повітря котлів при спалюванні в них природного газу. Наведена методика вибору КПП, результатом розрахунків за якою є визначення внутрішнього діаметра колони та висоти шару насадки з керамічних кілець Рашига розмірами $25 \times 25 \times 3 \text{ мм}$.

4) Напрямок подальших досліджень може бути розробка програмного забезпечення для автоматизованого розрахунку та вибору обладнання теплоутилізаційних установок у залежності від можливих потоків теплоти відхідних димових газів котлів та необхідного теплового навантаження споживачів гарячої води.

Список літератури:

1. Боженко М. Ф., Сало В. П. Енергозбереження в теплопостачанні : навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ». 2008. 268 с.
2. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О., Глушак О. Ю. Зменшення вологовмісту димових газів у конденсаційних теплоутилізаторах котельних установок. *Науковий вісник НЛТУ України*. Т. 29. № 8. 2019. С. 116 – 119. <https://doi.org/10.36930/40290821>.
3. Фіалко Н. М., Пресіч Г. О., Гнедаш Г. О., Навродська Р. О., Новаківський М. О. Технологія утилізації теплоти димових газів з підвищеним вологовмістом для газоспоживальних котлів комунальної енергетики. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. № 45 (1321). 2018. С. 70 – 77. [doi:10.20998/2413-4295.2018.45.09](https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.09).
4. Новаківський М. О. Комплексні теплоутилізаційні системи для котлів малої та середньої потужності з підвищеним вологовмістом відхідних газів. автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06 / ІТТФ НАН України. Київ, 2017. 21 с.
5. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Пресіч Г. О., Гнедаш Г. О. Теплові методи захисту газівідвідних трактів котельних установок під час застосування теплоутилізаційних установок. *Науковий вісник НЛТУ України*. Т. 27. № 6. 2017. С. 125 – 130. <https://doi.org/10.15421/40270625>.
6. Коржевін А. Д., Боженко М. Ф. Комплексна утилізація теплоти в пароводогрійній котельній системі централізованого теплопостачання. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. 16-19 квітня 2013 р. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. Т 1. С. 137.

7. Боженко М. Ф., Перевьорткіна І. Я. Каскадна утилізація теплоти димових газів опалювальних водогрійних котелень. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1 (43). 2016. С. 81 – 88.
8. Боженко М. Ф., Перевьорткіна І. Я. Підвищення ефективності утилізаторів теплоти димових газів котелень за рахунок зволоження дуттьового повітря. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1 (47). 2017. С. 51 – 57.
9. Боженко М. Ф., Озеруга О. В. Підвищення енергетичної та екологічної ефективності поверхневих теплоутилізаторів димових газів водогрійних котелень. *KPI Science News*. № 1. 2020. С. 7 – 14. DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.1.197948.
10. Боженко М. Ф., Озеруга О. В. Порівняльні характеристики утилізаційних установок димових газів котелень зі зволоженням дуттьового повітря. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1. 2020. С. 79-89. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2020.217572>.
11. Боженко М. Ф., Камишний Б. М. Методика визначення енергетичної ефективності утилізації теплоти димових газів котелень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т 35 (74). № 1 (2). 2024. С.34-39. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/06>.
12. Боженко М. Ф. Методика вибору поверхневих утилізаторів теплоти димових газів в котельнях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т 36 (75). № 1 (1). 2025. С.107 – 113. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/16>.
13. Боженко М. Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання повітря будівель [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019. 380 с.
14. Алабовский О. М., Боженко М. Ф., Хоренченко Ю. В. Проектирование котельных промышленных предприятий: Курсовое проектирование с элементами САПР: Навч. посібник для студентів вузів із спец. «Промислова теплотехніка». К.: Вища школа. 1992. 207 с.

Bozhenko M.F. METHODOLOGY FOR SELECTING EQUIPMENT FOR FLUE GAS HEAT RECOVERY IN BOILER HOUSES WITH COMBUSTION AIR HUMIDIFICATION

This article is devoted to increasing the energy efficiency of boiler equipment at industrial combined heat and power (CHP) plants and in boiler houses of centralized and moderately centralized heat supply systems operating on natural gas. It is well-known that the flue gas temperature at the outlet of many steam and hot water boilers exceeds 140 °C, leading to increased heat losses with exhaust gases and a corresponding reduction in the efficiency of these units. The implementation of flue gas heat recovery units for deep cooling of combustion products below the dew point increases their efficiency by enhancing the boiler's coefficient of performance (COP) and reducing natural gas consumption. Contact or surface heat exchangers can be used for these purposes. The implementation of measures to reduce environmentally harmful nitrogen oxide (NOx) emissions in fuel-burning plants is currently relevant. One of the effective methods for reducing NOx is the humidification of combustion air; for instance, in contact air heaters. Furthermore, combustion air humidification facilitates an increase in recovered heat flows in heat recovery units by raising the enthalpy of the flue gases at their inlet. For one of the schemes of comprehensive flue gas heat recovery in boiler houses, a methodology has been developed for selecting modular heat recovery units (HRUs) composed of standard surface-type air heaters under conditions of combustion air humidification and deep cooling of flue gases. It is expedient to operate such HRUs in the presence of low-temperature water consumers at an optimal flue gas outlet temperature $t_g^* = 20\text{--}30^\circ\text{C}$. After determining the maximum recovered heat flow, which is approximately 3 times greater than in the "dry" operating mode of the HRU and 1.3 times greater than during deep flue gas cooling without air humidification, the potential water flow rate is calculated. In calculating the heat transfer surface area of the HRU and selecting the number and arrangement of air heaters, the irrigation of the external tube surfaces by water vapor condensate from the flue gases is taken into account when determining the heat transfer coefficient. Within the recovery scheme, a methodology has also been developed for selecting contact air heaters (CAHs) based on standard decarbonizer designs for the humidification and heating of combustion air supplied for natural gas combustion in boilers. The results of the calculations using this methodology include the determination of the column internal diameter and the height of the packing layer consisting of ceramic Raschig rings with dimensions of $25 \times 25 \times 3$ mm.

Keywords: boiler house, natural gas, flue gases, temperature, moisture content, heat recovery unit, heat flows, combustion air, humidification, water.

Дата першого надходження статті до видання: 04.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 697.933.2
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/11>

Притула Н.О.

<https://orcid.org/0000-0002-3500-5165>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ляшенко А.М.

<https://orcid.org/0009-0002-6178-4833>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Середа В.В.

<https://orcid.org/0000-0002-4645-3123>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Соломаха А.С.

<https://orcid.org/0000-0002-1061-6277>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСУШЕННЯ ПОВІТРЯ В РЕБРИСТО-ТРУБНОМУ ОХОЛОДЖУВАЧІ

Вибір ефективного методу осушення повітря є критично важливим для оптимізації енергоспоживання в HVAC системах. Найбільш поширеною технологією є конденсаційне осушення, в якій повітря охолоджується нижче точки роси, що забезпечує видалення надлишкової вологи. Такий підхід має низку переваг, зокрема просту конструкцію, а також можливість одночасного охолодження й осушення повітря, що робить його ефективним рішенням для застосування в житлово-комунальному і промисловому секторі.

В статті розглянуто характерні робочі процеси, які відбуваються з повітрям під час його охолодження і осушення в ребристо-трубному охолоджувачі. Описано два найпоширеніших методи розрахунку теплопередачі – ентальпійний і температурний, а також проаналізовано наявні математичні моделі для визначення загальних коефіцієнтів теплопередачі. Відзначено складність існуючих залежностей для інженерного застосування.

Представлено результати експериментального дослідження тепломасообміну під час осушення повітря в охолоджувачі з хвилястим ребренням (серії Aerostar SDC), що використовує озонобезпечний холодоагент R32. Експерименти проводилися в діапазоні швидкостей повітря 1-3 м/с, холодильної потужності 2,4-6,8 кВт та кількості рядів труб 2-10. Описано конструкцію експериментальної установки, наведено методику проведення досліджень та обробки отриманих результатів. Визначено похибки всіх вимірювальних та розрахованих величин.

Побудовано графіки залежності загальних коефіцієнтів теплопередачі від швидкості повітря та кількості рядів труб. Виявлено найбільш суттєвий вплив витрати (швидкості) повітря на інтенсивність тепломасообміну. Водночас показано, що зміна холодильної потужності та кількості рядів труб не чинить суттєвого впливу на значення загальних коефіцієнтів теплопередачі в дослідженому діапазоні.

Ключові слова: теплопередача, холодоагент, осушення повітря, режимні параметри, хвилясте ребрення.

Постановка проблеми. Вологість відіграє ключову роль як у забезпеченні комфортних умов у приміщеннях, так і в промислових процесах. Вона суттєво впливає на тепловий комфорт, стан здоров'я людей та ефективність виробництва.

Найбільш поширеним способом видалення вологи з повітря є система конденсаційного осушення, в якій повітря осушується в результаті його охолодження нижче точки роси. Перевагою системи є відносна простота конструкції та можливість одночасно в одному пристрої реалізовувати процеси осушення та охолодження. Потреба в електроенергії для конденсаційного осушення найчастіше нижча, ніж для адсорбційного, а ексергетична ефективність конденсаційного осушення в 3–4 рази перевищує ефективність осушення адсорбційного обертового ротора [1].

В той же час, просте конденсаційне осушення має недолік, пов'язаний із необхідністю додаткового підігріву повітря після осушення. Часто затрати на підігрів можуть бути доволі суттєвими, що значно підвищує експлуатаційні витрати на роботу системи. Для підвищення ефективності застосовуються різні схемні рішення, направлені на утилізацію скидної теплоти, використання різних варіантів байпасування повітря, ускладнення принципової схеми системи осушування та її комбінування з іншими системами [1-4].

Для порівняння та моделювання процесів в розглянутих системах та пошуку нових схемних рішень для підвищення ефективності процесу конденсаційного осушення необхідно чітко розуміти процес в поверхневому осушувачі – ключовому елементі системи осушення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На рис. 1 ліворуч схематично показано процес «явного» охолодження повітря у вентиляційному каналі та h-d діаграма, що відповідає цьому процесу. На цьому ж рисунку показано процес з конденсацією вологи та відповідні h-d діаграми.

В HVAC системах охолодження повітря може відбуватися без конденсації водяної пари або з нею. У випадку охолодження без конденсації, температура повітря знижується, але вона не досягає точки роси. Водяна пара, яка міститься у повітрі, не конденсується, а залишається в газоподібному стані. Такий процес називається «простим» або «явним» охолодженням і може мати місце у системах кондиціонування на водяній основі (chilled water system).

Більшість діючих систем кондиціонування повітря на підприємствах з низькою вологістю є традиційними системами конденсаційного осушення [3-8]. Для реалізації теплопередачі між повітрям та охолоджуючою рідиною найчастіше використовуються ребристо-трубні теплообмінники (РТТ).

Якщо температура поверхні трубки або ребра зі сторони повітря нижча за температуру точки роси, то РТТ працюють у вологих умовах, з утворенням крапель конденсату або плівки на ребрах та трубках (рис. 2). У цьому випадку розрахунок теплопередачі РТТ ускладнюється через одночасний тепло- та масообмін, коли зі сторони повітря відбувається передача теплоти як в явному, так і в прихованому вигляді. Для розрахунку загального коефіцієнту теплопередачі РТТ під час осушення повітря найчастіше використовуються два методи: ентальпійний і температурний [9].

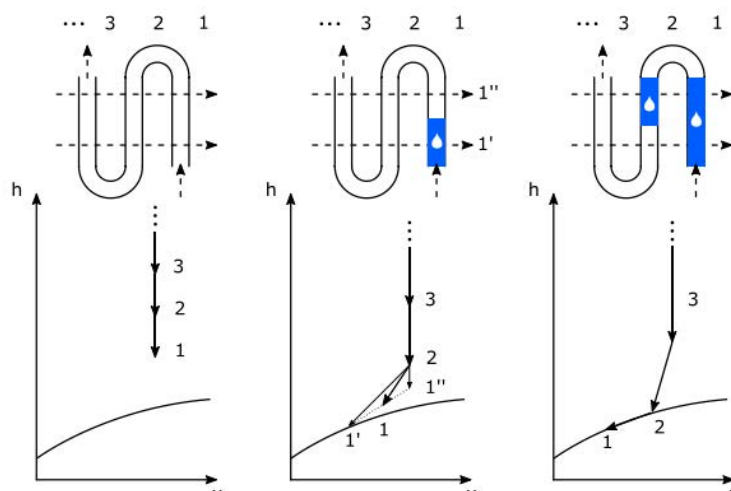


Рис. 1. Схематичне зображення характерних робочих процесів в поверхневому теплообміннику [2]

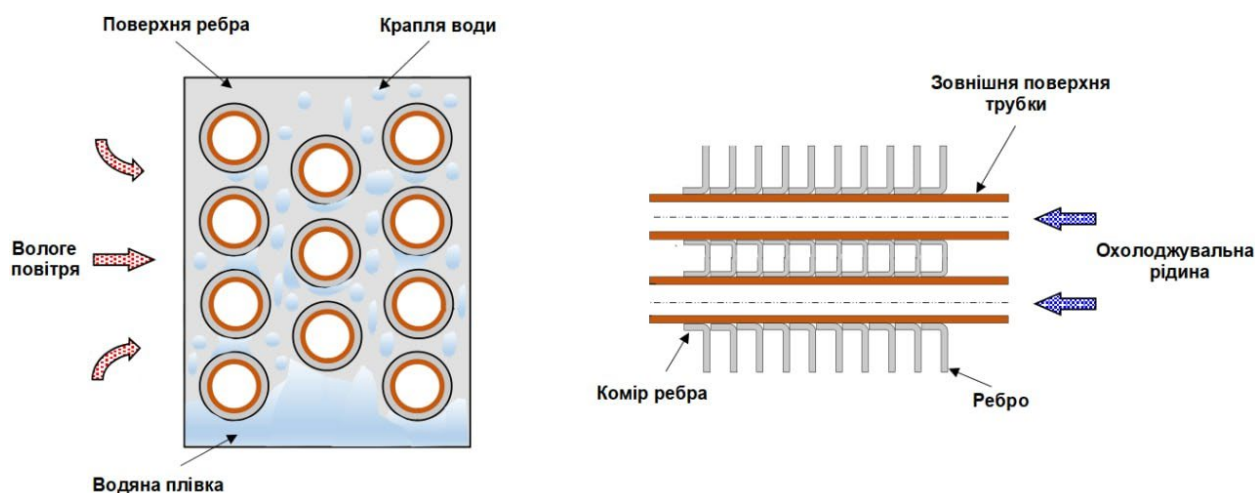


Рис. 2. Схема поперечного перерізу РТТ

Для ентальпійного методу різниця ентальпій є рушійним потенціалом процесів тепло- та масообміну. Гудман першим розробив ентальпійний підхід для розв'язання задачі одночасного тепло- та масообміну [10]. У 1970 році Трелкелд модифікував математичну модель на основі ентальпійного методу для розрахунку теплопередачі РТТ за умов осушення [11]. Загальна кількість теплоти, яка передається в РТТ визначається за формулою:

$$Q_{\text{заг}} = UA\Delta h_{\text{лог}}, \quad (1)$$

де A – площа поверхні теплообміну РТТ, м^2 ; $\Delta h_{\text{лог}}$ – логарифмічна середня різниця ентальпій, кДж/кг ; U – загальний коефіцієнт теплопередачі, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$.

Для РТТ із протитечійним рухом теплоносіїв:

$$\Delta h_{\text{лог}} = \frac{(h_{\text{пов}}^{\text{вх}} - h_{\text{ха,нас}}^{\text{вих}}) - (h_{\text{пов}}^{\text{вих}} - h_{\text{ха,нас}}^{\text{вх}})}{\ln \left[\frac{(h_{\text{пов}}^{\text{вх}} - h_{\text{ха,нас}}^{\text{вих}})}{(h_{\text{пов}}^{\text{вих}} - h_{\text{ха,нас}}^{\text{вх}})} \right]}, \quad (2)$$

де $h_{\text{ха,нас}}^{\text{вх}}$ та $h_{\text{ха,нас}}^{\text{вих}}$ є ентальпіями насиченого вологого повітря за температури холодоагенту на вході та виході з РТТ відповідно.

Температурний метод базується на реальній різниці температур між холодною поверхнею теплообмінника та вологим повітрям і подається у вигляді рівняння

$$Q_{\text{заг}} = kA\Delta t_{\text{лог}}. \quad (3)$$

де k – загальний коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $\Delta t_{\text{лог}}$ – середньолгарифмічна різниця температур, $^{\circ}\text{C}$.

Для протитечійної схеми середньолгарифмічна різниця температур визначається на основі рівняння (4), яке також застосовується для розрахунку РТТ в умовах сухого режиму роботи.

$$\Delta t_{\text{лог}} = \frac{(t_{\text{пов}}^{\text{вх}} - t_{\text{ха}}^{\text{вих}}) - (t_{\text{пов}}^{\text{вих}} - t_{\text{ха}}^{\text{вх}})}{\ln \left[\frac{(t_{\text{пов}}^{\text{вх}} - t_{\text{ха}}^{\text{вих}})}{(t_{\text{пов}}^{\text{вих}} - t_{\text{ха}}^{\text{вх}})} \right]}. \quad (4)$$

Формули для визначення загальних коефіцієнтів теплопередачі U та k наведені в працях [9, 12]. Наявні залежності є складними, що створює труднощі для інженерів під час проєктування HVAC систем.

Протягом останніх кількох десятиліть багато зусиль було спрямовано на розробку математичних моделей для «вологого режиму» роботи ребристо-трубного теплообмінника. У 2001 році Wang узагальнив результати досліджень, присвячених емпіричним залежностям для повітряної сторони ребристо-трубних теплообмінників із різними типами ребер у «сухих» та «вологих» режимах роботи [13]. Пізніше Pirompugd et al. [14] представили огляд математичних підходів, зокрема методу різниці ентальпій та методу еквівалентної температури сухого термометра. Qi [15] здійснив огляд експериментальних робіт, що стосуються дренажних характеристик теплообмінників у вологих умовах. Окрім цього, були проаналізовані математичні та CFD-моделі, які дозволяють оцінювати кути змочування, конфігурацію крапель на поверхні ребер та кількість води, що утримується на теплообмінниках [15]. Ganesan et al. [16] дослідив основні способи підвищення ефективності теплопередачі та поведінку перепаду тиску для різних типів ребер. Додатково розглянуто різні експериментальні та числові дослідження для різних типів теплообмінників, що охоплюють різні конструкції теплообмінних апаратів, їх теплові та аеродинамічні характеристики, а також впливу геометричних параметрів за різних діапазонів потоку [17].

Аналіз наукових праць показав, що існуючі дослідження недостатньо зосереджувалися на загальній теплопередачі РТТ у умовах конденсації вологи (режим осушення). Температурний метод є зручнішим і характеризується меншою обчислювальною складністю порівняно з ентальпійним. Однак такий підхід не враховує вплив масопередачі на ефективність ребер, що може призвести до значної розбіжності з експериментальними результатами, особливо для режимів із великою кількістю конденсату (осушення).

Постановка завдання. Метою дослідження є отримання емпіричних залежностей для визначення загальних коефіцієнтів теплопередачі за ентальпійним та температурним методами. Для цього було проведено експериментальне дослідження тепломасообміну під час осушення повітря в РТТ. Також вивчено вплив робочих умов (витрати повітря та холодильної потужності) на ефективність охолоджувача з хвилястим ребренням, що працює на холодоагенті R32.

Виклад основного матеріалу Експериментальна установка та методика проведення досліджень

Конструкцію та принцип дії припливно-рециркуляційної установки, яка змонтована компанією «Profinstall» в КПІ ім. Ігоря Сікорського (рис. 3) детально розглянуто у статті [18]. Для дослідження процесу осушення потоку повітря використовувалась секція охолодження з фреоновим охолоджувачем Aerostar серії SDC 40-20 і повітряним тепловим насосом. Теплообмінна поверхня РТТ SDC 40-20 складається з алюмінієвих пластин товщиною 0,1 мм, натягнутих на мідні трубки і має площу 8 м² [19]. Перелік і точність вимірювальних приладів, які використовувались в експерименті наведено в табл. 1.

Для визначення експериментальних значень коефіцієнтів U та k було проведено серію досліджень за змінної витрати повітря. Після запуску установки, витрата повітря встановлювалася в діапазоні 25...100% від потужності вентилятора. Плавне управління каналним вентилятором

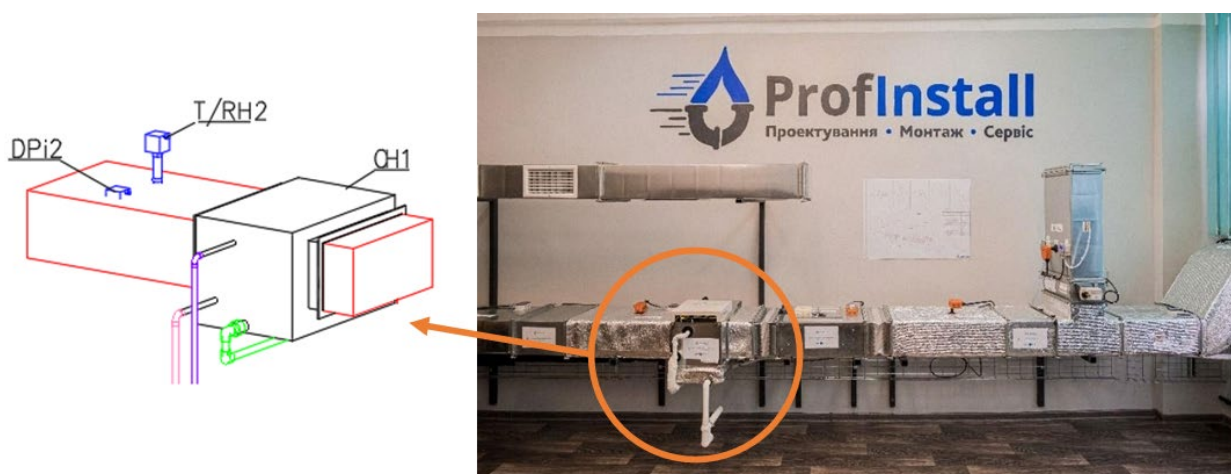


Рис. 3. Загальний вигляд установки: T/RH – датчик температури та вологості повітря на виході з охолоджувача; DPi – датчик перепаду тиску; CH1 – фреоновий охолоджувач Aerostar SDC 40-20 [19]

Таблиця 1

Специфікація вимірювальних приладів

Прилад	Параметр, позначення	Діапазон	Точність
Канальний зонд FloXact-L400	Об'ємна витрата повітря, $V_{\text{пов}}^{\text{вх}}$	від 100 м ³ /год	2%
Зовнішній датчик BELIMO 220UTH-11	Температура, $t_{\text{пов}}^{\text{вх}}$	-20...80 °C	±0.3°C
	Відносна вологість, $\phi_{\text{пов}}^{\text{вх}}$	0...100%	±2%
Датчик BELIMO 220DTH-11M	Температура, $t_{\text{пов}}^{\text{вих}}$	0...50 °C	±0.3°C
	Відносна вологість, $\phi_{\text{пов}}^{\text{вих}}$	0...100%	±2%
Термопара Pt1000	Температура холодоагенту, $t_{\text{ха}}^{\text{вх}}, t_{\text{ха}}^{\text{вих}}$	-40...270 °C	±0.3°C
Барометр	Атмосферний тиск, $P_{\text{атм}}$	80...106 кПа	±0.2 кПа
Мірна ємність	Кількість конденсату, $V_{\text{кон}}$	0-500 мл	±5 мл
Секундомір	Час накопичення конденсату, $t_{\text{кон}}$	—	—

здійснювалося за допомогою частотного перетворювача, встановленого в шафі керування. Система моніторингу для збору та виводу на екран комп'ютера параметрів повітря та установки детально описана в [20]. Після появи конденсату з дренажу розпочинали відлік часу за допомогою секундоміру для визначення тривалості відведення конденсату. Фіксацію параметрів повітря та холодоагенту на вході та виході з РТТ здійснювали після стабілізації температури повітря на виході з установки. Водночас вимірювали об'єм конденсату ємності та фіксували час його накопичення.

Обробку отриманих результатів вимірювань здійснювали за наведеною нижче методикою. Термодинамічні властивості холодоагенту R32 та вологого повітря визначали з використанням програмної бібліотеки CoolProp [21].

Масова витрата конденсату, якій накопичувався у мірному циліндрі:

$$G_{\text{кон}} = V_{\text{кон}} / t_{\text{кон}} \quad (5)$$

Теплота, яка відводиться з охолодника конденсатом:

$$Q_{\text{кон}} = G_{\text{кон}} r, \quad (6)$$

де r – питома теплота пароутворення водяної пари, $r \approx 2450$ кДж/кг.

Масова витрата сухого повітря, яке подається до експериментальної установки:

$$G_{\text{пов}} = V_{\text{пов}}^{\text{вх}} \rho_{\text{пов}}^{\text{вх}} \quad (7)$$

Швидкість повітря на вході в РТТ:

$$w_{\text{пов}}^{\text{вх}} = V_{\text{пов}}^{\text{вх}} / F, \quad (8)$$

де $F = 0,08$ м² – площа поперечного перерізу охолоджувача Aerostar SDC 40-20 [19].

Теплота, яка відводиться від повітря в охолоднику під час явного теплообміну:

$$Q_{\text{яв}} = G_{\text{пов}} c_{p,\text{пов}} (t_{\text{пов}}^{\text{вх}} - t_{\text{пов}}^{\text{вих}}). \quad (9)$$

Теплота, яка відводиться від повітря в охолоднику за рахунок зміни вмісту вологи у повітрі:

$$Q_{\text{пр}} = G_{\text{пов}} r (d_{\text{пов}}^{\text{вх}} - d_{\text{пов}}^{\text{вих}}). \quad (10)$$

Повна теплота, яка відводиться від повітря під час його охолодження з осушуванням:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{яв}} + Q_{\text{пр}}. \quad (11)$$

Тепловий баланс охолодника визначався за наступною формулою:

$$Q_{\text{кон}} = Q_{\text{пр}}. \quad (12)$$

Співвідношення теплового балансу між конденсатом та повітрям для всіх експериментів

наведено на рис. 4. Як видно, максимальна розбіжність між $Q_{\text{пр}}$ та $Q_{\text{кон}}$ не перевищує 5%.

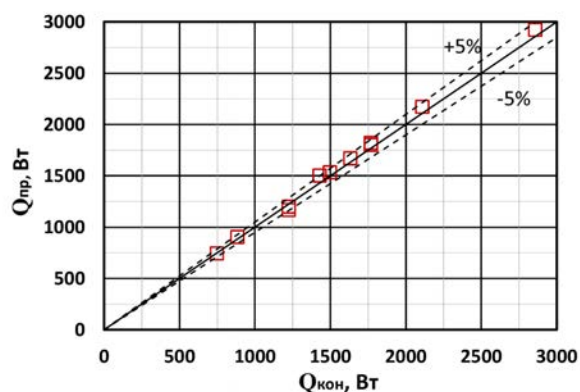


Рис. 4. Співвідношення між $Q_{\text{кон}}$ та $Q_{\text{пр}}$ під час проведення експериментів

Знаючи відповідні експериментальні значення для загального теплового потоку та ентальпій можна за рівняннями (1) та (3) знайти відповідно загальні коефіцієнти теплопередачі U та k :

$$U_{\text{екс}} = \frac{Q_{\text{заг}}}{A \Delta t_{\text{лог}}}; \quad (13)$$

$$k_{\text{екс}} = \frac{Q_{\text{зак}}}{A \Delta t_{\text{лог}}}. \quad (14)$$

Для оцінки впливу кількості рядів труб на інтенсивність тепломасообміну було проаналізовано експлуатаційні дані поверхневих теплообмінників компанії Aerostar для різних повітроохолоджувачів SDC. Порівняння проводилося за постійної масової витрати та ідентичних вхідних температурних параметрів повітря.

Оцінка похибок всіх розрахованих параметрів проводилася за методом, описаним в [22]. Підсумкові результати наведено в табл. 2. Встановлено, що максимальна сумарна невизначеність експериментальних результатів становить 11,8%.

Таблиця 2
Стандартні похибки розрахованих параметрів

Параметр	Діапазон	Похибка
$G_{\text{кон}}$	1,1-4,2 кг/год	0,45%
$G_{\text{пов}}$	348-954 кг/год	5,9%
$Q_{\text{кон}}$	0,75-2,9 кВт	0,5%
$Q_{\text{пр}}$	0,7-2,9 кВт	10,4%
$Q_{\text{яв}}$	1,6-5,0 кВт	6,4%
$Q_{\text{заг}}$	2,38-6,8 кВт	8,3%
U	0,0239-0,044 кг/(м ² ·с)	11,8%
K	35,5-75,4 Вт/(м ² ·К)	8,6%

Результати дослідження. Проведені дослідження показали, що серед усіх розглянутих початкових параметрів найбільш суттєвий вплив має

витрата (швидкість) повітря, що рухається через РТТ. На рис. 6 та 7 наведено залежність коефіцієнтів теплопередачі від швидкості повітря на вході в РТТ. Як видно, вплив витрати повітря є співставним для обох випадків. Різна потужність холодильного обладнання впливала на абсолютне значення кількості теплоти, що відводилася від повітря, але набагато менше впливала на отримані коефіцієнти теплопередачі в дослідженому діапазоні.

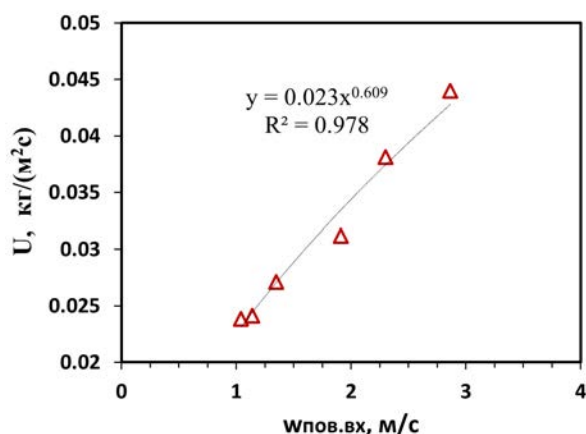


Рис. 5. Вплив витрати повітря на коефіцієнт теплопередачі, порахований ентальпійним методом

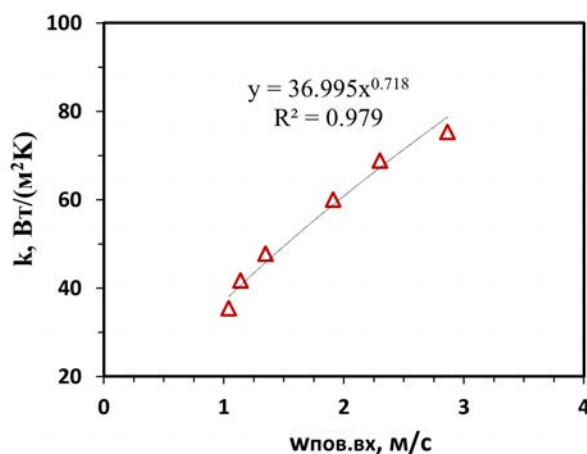


Рис. 6. Вплив витрати повітря на коефіцієнт теплопередачі, порахований через середній температурний напір

Аналіз експлуатаційних даних для РТТ з різною кількістю рядів також не виявив додаткового впливу на тепло і масообмін (рис.8).

Отримані експериментальні дані вдалося узагальнити рівняннями:

$$U = 0,023 w_{\text{пов}}^{0.61}, \quad (15)$$

$$k = 37 w_{\text{пов}}^{0.718}. \quad (16)$$

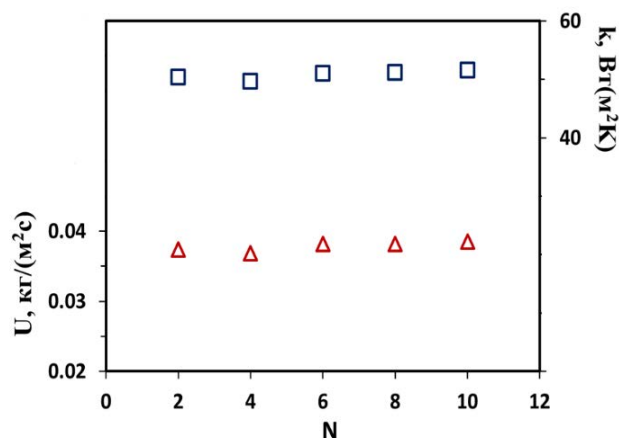


Рис. 7. Вплив кількості рядів в охолоджувачі на коефіцієнти теплопередачі

Вірогідність апроксимації для обох рівнянь становить $R^2=0,98$.

Висновки. У статті експериментально досліджено процес теплопередачі під час осушення повітря в поверхневому ребристо-трубному охолоджувачі прямого випаровування (холодоагент R32).

Існуючі ентальпійний і температурний методи розрахунку теплопередачі в РТТ під час охолодження і осушення повітря мають певні недоліки. Ентальпійний метод є надто складним для інженерної практики та потребує значних обчислювальних ресурсів. Використання температурного методу в умовах повного або частково змочування поверхні призводить до значних розбіжностей з експериментальними результатами.

Встановлено, що серед робочих параметрів найбільший вплив на ефективність осушення має витрата повітря. Показано, що кількість рядів та холодильна потужність суттєво не впливають на коефіцієнти теплопередачі під час осушення.

Отримано нові прості емпіричні рівняння загальних коефіцієнтів теплопередачі (15) та (16) для ентальпійного та температурного методу розрахунку. Запропоновані залежності описують експериментальні дані з похибкою $\pm 2\%$ і рекомендовані до використання для ребристо-трубних охолоджувачів з геометрією, характерною для серії Aerostar SDC, у діапазоні зміни швидкостей повітря від 1 до 3 м/с.

Результати роботи будуть використані для математичного моделювання різних перспективних схем осушення повітря, зокрема систем з утилізацією скидної теплоти, схем з різним байпасуванням, а також комбінованих систем.

Список літератури:

1. Fenghua Ge., Cong W., "Exergy analysis of dehumidification systems: A comparison between the condensing dehumidification and the desiccant wheel dehumidification," *Energy Conversion and Management*, Volume 224, 15 November 2020, 113343. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113343>.
2. Das Vorhaben, "Optimale Regelungsstrategie zum effizienten Betrieb von Klimaanlagen und deren Kälteversorgung," Förderkennzeichen 1050-B5-0.
3. Ding Y., Tian Z., Zhu N., "The retrofit of industrial air-conditioning system on energy efficiency and emission reduction," *Energy Build*, 42(6), 955-8, 2010.
4. Shan K., Wang S., "Energy efficient design and control of cleanroom environment control systems in subtropical regions - a comparative analysis and on-site validation," *Applied Energy*, Volume 204, 15 October 2017, Pages 582-595. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.050>.
5. Ambat R., Piotrowska K., "Humidity and electronics: corrosion perspectives," *Humidity and Electronics*, p. 1-18, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90853-5.00004-9>.
6. Carvalho M.O., Fradinho P., Martins M.J., Magro A., Raymundo A., Sousa I., "Paddy rice stored under hermetic conditions: the effect of relative humidity, temperature and storage time in suppressing *Sitophilus zeamais* and impact on rice quality," *Journal of Stored Products Research*, Volume 80, January 2019, Pages 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.11.002>.
7. H. An, P. Cui, L. Fang, W. Wang, D. Zhao, W. Yuan, "Study on the performance of heat and mass transfer of cross flow dehumidifier in an industrial plant," *Procedia Engineering*, Volume 205, 2017, Pages 1515-1522. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.381>.
8. A. Giampieri, J. Ling-Chin, Z. Ma, A. Smallbone, AP. Roskilly, "A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective," *Applied Energy*, Volume 261, 1 March 2020, 114074. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114074>.
9. G. Zhang, B. Wang, X. Li, W. Shi, Y. Cao, "Review of experimentation and modeling of heat and mass transfer performance of fin-and-tube heat exchangers with dehumidification," *Applied Thermal Engineering*, Volume 146, Pages 701-717, 5 January. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.032>.
10. W. Goodman, "Performance of coils for dehumidifying air," *Heating, Piping and Air Conditioning*, 10 (1938) 697-707.
11. J. L. Threlkeld, "Thermal Environment Engineering," Prentice-Hall, 2nd ed, 1970.
12. Naef A.A. Qasem, Syed M. Zubair, "Compact and microchannel heat exchangers: A comprehensive review of air-side friction factor and heat transfer correlations," *Energy Conversion and Management*, Volume 173, 1 October 2018, Pages 555-601. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.104>.
13. C.C. Wang, W.S. Lee, W.J. Sheu, J.S. Liaw, "Empirical airside correlations of fin-and-tube heat exchangers wider dehumidifying conditions," *International Journal of Heat Exchangers*, 151-178, 2001.
14. W. Pirompugd, C.C. Wang, S. Wongwises, "A review on reduction method for heat and mass transfer characteristics of fin-and-tube heat exchangers under dehumidifying conditions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 52, Issues 9-10, April 2009, Pages 2370-2378. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.019>.
15. Z. Qi, "Water retention and drainage on air side of heat exchangers. A review," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Volume 28, December 2013, Pages 1-10. DOI:10.1016/j.rser.2013.07.014.
16. P. Ganesan, Sh.M. Vanaki, K.K. Thoo, W.M. Chin, "Air-side heat transfer characteristics of hydrophobic and super-hydrophobic fin surfaces in heat exchangers: A review," *International Communications in Heat & Mass Transfer*, Volume 74, May 2016, Pages 27-35. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.02.017.
17. A.A. Bhuiyan, A. K. M. Sadrul Islam, "Thermal and hydraulic performance of finned-tube heat exchangers wider different flow ranges: A review on modeling and experiment," *International Journal of Heat & Mass Transfer*, Volume 101, October 2016, Pages 38-59. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.022>.
18. Притула Н. О., Ляшенко А. М., "Валідація лабораторного стенду для дослідження процесу конденсаційного осушення повітря," *Енергетика і автоматика*, №1, с.53-68, 2025. [https://doi.org/10.31548/energiyal\(77\).2025.053](https://doi.org/10.31548/energiyal(77).2025.053).
19. <https://aerostar.ua/ua>
20. Соломаха А. С., Притула Н. О., Середа В. В., Ляшенко А. М., "Технічна термодинаміка. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» спец. 144 Теплоенергетика," КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл: 5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, назва з екрана, с. 119, 2025. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74704>.
21. CoolProp. <http://www.coolprop.org/>
22. Jack Philip Holman, "Experimental methods for engineers," J. P. Holman, 8th ed. p. cm., (McGraw-Hill series in mechanical engineering), ISBN-13: 978-0-07-352930-1.

Prytula N.O., Lyashenko A.M., Sereda V.V., Solomakha A.S. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE AIR DEHUMIDIFICATION PROCESS IN A FINNED-TUBE HEAT EXCHANGER

The selection of an efficient air dehumidification method is critically important for optimizing energy consumption in HVAC systems. The most widely used technology is condensation-based dehumidification, in which air is cooled below its dew point, ensuring the removal of excess moisture. This approach offers several advantages, including a simple design and the possibility of simultaneous air cooling and dehumidification, which makes it an effective solution for applications in both the residential–commercial and industrial sectors.

The article examines the characteristic operating processes that occur during air cooling and dehumidification in a finned-tube cooler. Two of the most commonly used methods for heat transfer calculation: the enthalpy-based and temperature-based methods are described, and existing mathematical models for determining overall heat transfer coefficients are analyzed. The complexity of the available correlations for practical engineering applications is noted.

The results of an experimental investigation of heat and mass transfer during air dehumidification in a cooler with wavy fins (Aerostar SDC series) using the ozone-friendly refrigerant R32 are presented. The experiments were conducted over an air velocity range of 1–3 m/s, a cooling capacity range of 2.4–6.8 kW, and with 2–10 tube rows. The design of the experimental setup is described, along with the research methodology and the procedures used for processing the experimental data. The uncertainties of all measured and calculated quantities are determined.

Graphs showing the dependence of the overall heat transfer coefficients on air velocity and the number of tube rows are constructed. The air flow rate (velocity) is identified as the most significant factor affecting the intensity of heat and mass transfer. At the same time, it is shown that variations in cooling capacity and the number of tube rows do not have a significant effect on the values of the overall heat transfer coefficients within the investigated range.

Keywords: heat transfer, refrigerant, air dehumidification, operating parameters, wavy fins.

Дата першого надходження статті до видання: 23.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 536.24:533.6.011
DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/12>

Рачинський А.Ю.

<https://orcid.org/0009-0006-2120-5541>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баранюк О.В.

<https://orcid.org/0000-0001-6008-6465>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тихоход В.О.

<https://orcid.org/0000-0002-1525-4770>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пікенін О.О.

<https://orcid.org/0000-0003-2602-4708>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УДОСКОНАЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ КОТЛА ДКВР-10-13 ПРИ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ПАЛИВНОЇ БАЗИ

У статті розглянуто актуальну проблему модернізації котельного обладнання промислової та комунальної енергетики України в умовах критичного фізичного зносу та необхідності виконання екологічних директив ЄС щодо декарбонізації. Об'єктом дослідження є процеси тепломасообміну в паливній котла ДКВР-10-13 при переході з природного газу на біогаз. Методом чисельного CFD-моделювання в середовищі ANSYS проведено порівняльний аналіз процесів, що мають місце в паливній котла при спалюванні метану та багатокомпонентного біогазу (67,76% CH_4 , 31% CO_2). Наукова новизна роботи полягає у встановленні взаємозв'язку між баластною складовою палива, структурою температурних полів та інтенсивністю генерації оксидів азоту. Математичну модель реалізовано на основі рівнянь RANS, доповнених моделлю турбулентності Realizable k - ϵ та моделлю хімічної взаємодії Eddy-Dissipation Concept (EDC), що дозволило врахувати вплив H_2 та H_2S на кінетику горіння. Встановлено, що використання біогазу призводить до «розмиття» ядра факела та зниження пікових температур на 100...150 °C, що забезпечує стабільну деноксифікацію продуктів згоряння без впровадження систем очистки. Визначено, що попри зростання прямих викидів CO_2 на 66% (до 92,03 кг/ГДж) за рахунок нижчої калорійності палива, біогенне походження вуглецю забезпечує нульовий вуглецевий баланс згідно з принципами LCA. Доведено, що підвищена концентрація CO_2 у факелі інтенсифікує радіаційний теплообмін, частково компенсуючи зниження температури горіння. Результати моделювання також вказують на збільшення далекобійності факела при роботі на біогазі, що створює додаткове термічне навантаження на задній екран і повинно враховуватися при оцінці малоциклової втоми металу барабанів. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні технічної можливості та екологічної доцільності переведення котлів типу ДКВР на альтернативні види палива в межах стратегії енергонезалежності.

Ключові слова: котли ДКВР, біогаз, CFD-моделювання, оксиди азоту, декарбонізація, температурне поле, ANSYS, енергоефективність.

Постановка проблеми. Сучасний стан вітчизняного енергетичного сектору характеризується критичним рівнем фізичного та морального зносу обладнання, більша частина якого експлуатується понад 40–60 років. Для котлів типу ДКВР та ГМ-50 типовими є теплові та гідравлічні перекоси, що призводять до нерівномірності термічного навантаження та виникнення додаткових напружень у металі. Понад 80% аварійних відмов котлів ДКВР-20-13 пов'язані з локальним перегрівом екранних труб, що особливо загострюється при роботі на низьких тисках, де ККД може знижуватися до 70–75%. Це зумовлює необхідність переведення таких агрегатів у водоگрійний режим та впровадження систем моніторингу на основі комп'ютерного моделювання [1].

Розвиток біогазових технологій та диверсифікація паливної бази. В умовах прагнення до енергетичної незалежності та виконання екологічних директив ЄС (2010/75/ЄС, 2015/2193[2]), в Україні спостерігається динамічне зростання біогазових потужностей. Біогаз, що складається переважно з метану (CH_4) та діоксиду вуглецю (CO_2), розглядається як вуглецево-нейтральна альтернатива природному газу. Прогнозується, що за умови державної підтримки частка відновлюваних джерел енергії у загальному споживанні може зрости до 91% до 2050 року. Особливий науковий інтерес викликає використання біогазу в промислових котлах, проте відмінність теплофізичних властивостей його продуктів згоряння від еталонних (до 6%) потребує коригування класичних методик теплового розрахунку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні вимоги до декарбонізації енергетики зумовлюють перехід на вуглецево-нейтральні види палива, зокрема біогаз. Дослідження спалювання суміші метану та CO_2 (76% CH_4 та 24% CO_2) на паровому котлі ДКВР-6.5-13 підтвердили можливість зниження рівня NO_x до 63...76 мг/Нм³, що відповідає стандартам ЄС для установок потужністю понад 1 МВт [3]. Питання екологізації застарілих котлів типу ДКВР 10-13 також ефективно вирішується методом впорскування пари в зону горіння. Зокрема, використання модернізованих розпилювальних торцевих кришок інжекторів дозволяє досягти 30% зниження емісії оксидів азоту при збереженні теплової ефективності агрегату [4].

Заміна природного газу біогазом потребує врахування змін у теплообміні через відмінність властивостей продуктів згоряння [5]. Аналіз показав, що теплопровідність та в'язкість суміші газів

біогенного походження відрізняються від еталонних показників на 6%, що при використанні стандартних методик розрахунку призводить до завищення значень температури відхідних газів та витрати палива. Аналіз доступно літератури свідчить, що в Світі окрему увагу приділяють технологіям кисневого горіння (oxy-fuel). Використання моделей турбулентності k- ω SST та FGM-моделей для аналізу спалювання біогазу в окислювачах O_2/CO_2 та $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ виявило [6], що перехід до киснево-парового режиму підвищує однорідність теплового потоку на стінці котла на 129,9%. Також встановлено, що підвищення вмісту O_2 понад 50% у режимі $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ не є економічно доцільним, попри зростання пікових температур до 2283 К.

Дослідження технології спільного спалювання в тангенціальних печах потужністю 300 МВт продемонстрували [7], що впорскування біогазу монотонно знижує концентрацію NO на виході. Найкращі показники екологічності при фіксованому коефіцієнті заміщення досягаються при використанні біогазу з тирси, при цьому зміна кута нахилу пальників до -15° сприяє росту концентрації NO на виході. Для котлів із барботажним киплячим шаром встановлено, що оптимальною точкою інтеграції біогазу є перший ряд вхідних отворів вторинного повітря, що забезпечує кращу стабільність горіння порівняно з подачею через пальник завантаження.

Ексергетичні оцінки процесу горіння окси-біогазу в адіабатичних печах [8] свідчать про зниження суми питомої термомеханічної та хімічної ексергії продуктів згоряння зі збільшенням частки CO_2 у паливі. Частка втрат ексергії внаслідок неповного згоряння зростає з 5,8% до 13,8% при збільшенні вмісту CO_2 з 10% до 40%. Проте застосування рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) дозволяє реалізувати режим низькотемпературного горіння (MILD) для біогазу складу 60/40, що забезпечує рівномірний розподіл температур та зниження термічного навантаження на елементи топki [9].

Питання залишкового ресурсу барабанів котлів типу ДКВР та ГМ-50 залишається гострим через наявність концентраторів напружень. Встановлено, що найбільші напруження виникають у місцях зварних швів еліптичних кришок та поблизу отворів опускних труб [10]. Чисельне моделювання показало, що нерівномірність теплових полів, викликана конструктивними особливостями пальників, безпосередньо впливає на малоциклову втому металу, обмежуючи прогнозний

термін експлуатації барабанів до 15 років при поточних режимах навантаження [11].

Дослідження вказують на пріоритетність контролю пікових температур (1650–1900 K) для пригнічення генерації термічних оксидів азоту. Серед ефективних методів виділяють:

- Рециркуляцію димових газів (РДГ): здатна знизити емісію NO_x на 67...5%.

- Ступінчасте горіння: впровадження вітчизняних струменево-нішевих пальників 3-го покоління дозволяє знизити викиди за рахунок кращої аеродинаміки факела.

- Впорскування пари: метод, впроваджений для котлів ДКВР, забезпечує зниження NO_x на 30% при збереженні ефективності агрегату.

- Зміна геометрії газороздачі: встановлено, що використання прямокутних щілин замість круглих отворів у пальниках знижує NO_x на 12%, проте збільшує ризик перегріву заднього екрана через надмірну довжину факела.

Аналіз доступної літератури вказує на наявність двох ключових груп чисельних методів: CFD (ANSYS Fluent/CFX) для теплогідродинаміки та FEM (ANSYS Mechanical) для термомеханічного аналізу. CFD-моделювання: типи підходів з використанням моделей Species Transport та k- ϵ дозволяють детально візуалізувати зони активного горіння та розподіл теплових потоків (30...380 кВт/м² для ГМ-50). CFD -моделювання: необхідне для прогнозування залишкового ресурсу барабанів-сепараторів, які є найбільш навантаженими вузлами. Наразі у відкритому доступі відсутня універсальна методика, що поєднає CFD та FEM з урахуванням історії навантажень для об'єкта радіаційного зразка, що і визначає наукову нішу даного дослідження.

Особливістю котлів ДКВР є контакт корпусу барабана з розжареними газами, що спричиняє вторинну генерацію пари та порушення солявого балансу. Чисельні дослідження показують, що це створює складну хвилясту поверхню «дзеркала випаровування», що сприяє винесенню забруднень у пароперегрівач та ерозії турбін. Розрахунки вказують на виникнення максимальних напружень ($D_s = 128$ МПа) у місцях зварних швів еліптичних кришок та біля отворів опускних труб.

Проведений аналіз наукової літератури підтверджує, що використання біогазу як альтернативного палива є одним із ключових векторів декарбонізації енергетики. Попри значну кількість фундаментальних досліджень у галузі спалювання біомаси та біогазу, залишається низка

невирішених питань, що потребують подальшого вивчення:

Постановка завдання. Метою статті є підвищення надійності та екологічної безпеки експлуатації котельних агрегатів промислової (типу ДКВР) та муніципальної (малої потужності) енергетики шляхом розробки комплексних чисельних моделей теплотехнічних та термомеханічних процесів при диверсифікації паливної бази.

Метод дослідження – CFD-моделювання основних характеристик процесів горіння під час спалювання метану і біогазу в комп'ютерній моделі паливни котла ДКВР-10-13 в штатних і модернізованих пальниках ГМГ-5. 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'єктом дослідження є процеси тепломасообміну, горіння та формування напружено-деформованого стану в елементах котельних агрегатів промислової та муніципальної енергетики (зокрема котлів типу ДКВР та пелетних котлів малої потужності) при їх експлуатації на альтернативних видах палива.

Предметом дослідження є пошук взаємозв'язку між складом біопалива, конструктивними параметрами пальників, температурними полями в паливні та показниками екологічної безпеки NO_x .

Виклад основного матеріалу. Для дослідження процесів тепломасообміну та горіння біогазу в паливні котла застосовано систему тривимірних рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії, осереднених за Рейнольдсом (RANS). Враховуючи специфіку палива (суміш CH_4 та CO_2), математичний опис процесу доповнено рівняннями переносу хімічних компонентів та моделями турбулентно-хімічної взаємодії [12].

Течія багатокомпонентного середовища описується рівняннями нерозривності та рівняннями Нав'є–Стокса:

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho u v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho g \quad (2)$$

де ρ – густина суміші, яка розраховується за законом ідеального газу для нестисливого середовища; u – вектор швидкості; $\bar{\tau}$ – тензор напружень.

Перенос енергії в зоні горіння враховує конвекцію, теплопровідність, дифузію компонентів та виділення теплоти внаслідок хімічних реакцій [13]:

$$\nabla \cdot (u(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(\lambda_{eff} \nabla T - \sum h_j J_j + \left(\tau_{eff} \cdot u \right) \right) + S_h \quad (3)$$

У контексті дослідження спалювання біогазу в котлі ДКВР, воно описує, як теплота розподіляється в паливній та як локальні хімічні процеси змінюють температурне поле. Нижче наведено детальний опис кожного члена рівняння:

– $\nabla \cdot (u(\rho E + p))$ – Конвективний перенос: Визначає потік енергії, що переноситься макроскопічним рухом газу зі швидкістю u . Врахування тиску p разом із внутрішньою енергією $(E+p)$ фактично описує перенос ентальпії. Це ключовий механізм поширення тепла від смолоскипів пальників по всьому об'єму топки.

– Дифузія та в'язка дисипація (Права частина в дужках). Ці члени описують перенос енергії на молекулярному та турбулентному рівнях:

– $\lambda_{eff} \nabla T$ – Теплопровідність: Описує перенос тепла завдяки градієнту температури. Коефіцієнт λ_{eff} є ефективною теплопровідністю, що враховує як молекулярну теплопровідність газу, так і турбулентну теплопровідність (λ_t), яка в умовах топки ГМ-50 є домінуючою.

– $\sum h_j J_j$ – Дифузійний перенос енергії: Описує перенос тепла, зумовлений дифузією самих хімічних речовин (компонентів j). Кожен компонент несе свою питому ентальпію h_j . У зоні горіння біогазу це дуже важливо, оскільки активна дифузія палива (CH_4 , H_2) у зону реакції супроводжується значним переносом енергії.

– $\tau_{eff} \cdot u$ – В'язка дисипація: Описує перетворення кінетичної енергії руху газу в теплову через в'язку тертя. У паливних котлів цей член зазвичай має малий вплив, але враховується для повноти фізичної моделі [14].

– Джерело тепловиділення (S_h) – Хімічне джерело: Найважливіший член для вашого моделювання [15]. Він розраховується як:

$$S_h = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (4)$$

де h_j^0 – ентальпія утворення компонента, а R_j – швидкість його утворення або витрати в хімічній реакції. Саме тут враховується нижча теплота згорання біогазу. Оскільки біогаз містить 31% CO_2 , густина тепловиділення S_h у вашій моделі буде нижчою, ніж для чистого метану.

При описі цього рівняння варто підкреслити, що λ_{eff} та J_j розраховуються з урахуванням турбулентних характеристик, отриманих з Realizable k-ε моделі. Це дозволяє вашій моделі коректно відтворювати структуру полум'я та зони максимальних теплових напружень на екранах котла.

Для деталізації джерела тепловиділення S_h у вашій математичній моделі необхідно розкласти його на складові, що відповідають кожному горючому компоненту вашого специфічного біогазу. Це підкреслить глибину вашого дослідження та врахування багатокомпонентності палива.

Деталізація об'ємного джерела тепловиділення S_h . У загальному вигляді об'ємне джерело тепловиділення в рівнянні енергії визначається як сума теплових ефектів усіх хімічних реакцій, що протікають у розрахунковій комірі:

$$S_h = - \sum_j \left(\frac{h_j^0}{M_j} + \int_{T_{ref}}^T (C_p)_j dT \right) R_j \quad (5)$$

де: h_j^0 – стандартна ентальпія утворення j -го компонента при $T_{ref} = 298,15 \text{ K}$; M_j – молярна маса компонента; R_j – сумарна швидкість утворення/витрати j -го компонента внаслідок хімічних реакцій, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$.

Біогаз містить 67,76% CH_4 ; 31% CO_2 ; 0,44% O_2 ; 0,57% N_2 ; 0,13% H_2 ; 0,04% H_2S , тому джерело тепловиділення S_h декомонується на три основні складові:

– Тепловиділення від окиснення метану (CH_4). Це основний внесок у S_h (понад 99% енергії). Оскільки метан у вашому біогазі складає 67,70% об'єму, швидкість тепловиділення безпосередньо залежить від швидкості реакції R_{CH_4} , яка у свою чергу лімітується моделлю Eddy-Dissipation Concept (EDC).

– Тепловиділення від окиснення водню (H_2). Незважаючи на низьку концентрацію (0,13%), водень має надзвичайно високу швидкість горіння та питому теплоту згорання ($Q_{\text{H}_2} \approx 120 \text{ МДж/кг}$). Врахування цього компонента дозволяє точніше змодельовати зону займання (ignition zone) біля виходу з пальника, оскільки водень виступає «запалом» для метану.

– Тепловиділення від окиснення сірководню (H_2S). Внесок H_2S (0,04%) у загальний тепловий баланс мінімальний, проте його врахування в члені S_h є принциповим для коректного розрахунку локальних температур у зонах, де починається утворення SO_2 . Вплив баласту (CO_2 та N_2) на S_h . Хоча вуглекислий газ (31%) та азот (0,57%) не дають позитивного внеску в S_h , вони відіграють роль «теплого стоку». Велика кількість CO_2 у зоні горіння поглинає частину енергії на свій нагрів: Знижує локальну температуру (що зменшує S_h через температурну залежність швидкостей реакцій). Змінює теплоємність суміші $(C_p)_{mix}$, що входить у рівняння енергії.

Завершує опис математичної моделі модель механізму розрахунку швидкості хімічних реакцій.

цій R_f , оскільки саме цей параметр пов'язує рівняння переносу енергії з газодинамікою потоку. Використана для розрахунку швидкостей реакцій модель Eddy-Dissipation Concept (EDC).

Граничні умови та параметри моделювання [16, 17]. З метою порівняння енергетичної та екологічної ефективності котла ГМ-50 при переході на альтернативне паливо, встановлено наступні параметри розрахункової схеми:

1. Вхід палива (Fuel Inlet). Для обох випадків задано граничну умову типу «Mass Flow Inlet» (масова витрата на вході). Природний газ: Склад прийнято як 100% CH_4 (спрощена модель). Нижча теплота згоряння $Q_p = 35,8$ МДж/нм³. Біогаз: Нижча теплота згоряння суміші становить приблизно 21,5 МДж/нм³. Згідно заданого складу розраховані масові частки (Mass Fractions) і задані в якості граничних умов. Температура палива 313 К (з урахуванням підігріву).

2. Подача повітря (Air Inlet) Гранична умова задана як «Velocity Inlet» (швидкість на вході) або «Mass Flow Inlet». Коефіцієнт надлишку повітря (α): Для обох випадків прийнято рівним 1,05. Склад повітря: $Y_{\text{O}_2} = 0,233$; $Y_{\text{N}_2} = 0,767$. Температура: Повітря подається після повітропідігрівника з температурою 423 К (150 °С). Оскільки біогаз містить менше метану на одиницю об'єму палива, масова витрата повітря для біогазу при однаковій витраті суміші палива повинна бути перерахована відповідно до стехіометричного відношення для забезпечення стабільного горіння.

3. Стінки паливні (Walls). Для стінок екранних труб задано граничну умову типу «Wall» із тепловими характеристиками:

Тепловий режим: Задано фіксовану температуру стінки або коефіцієнт теплопередачі. Враховуючи робочий тиск у барабані 3,9 МПа, температура насичення становить ≈ 250 °С. Emissivity (Ступінь чорноти): Для зашлакованих стінок прийнято $\epsilon = 0,8 \dots 0,85$.

4. Вихід димових газів (Pressure Outlet). На виході з паливні (у площині фєстону) встановлено умову «Pressure Outlet»: Static Pressure: 0 Па (надлишковий тиск відносно атмосферного). Backflow Temperature: 1200...1300 К (температура газів на виході для запобігання проблемам зі збіжністю при зворотному тоці).

Обговорення отриманих результатів. На рис. 1 наведено результати чисельного моделювання розподілу температур у поздовжньому перерізі паливні котла ДКВР-10-13. Порівняльний аналіз полів температур дозволяє оцінити вплив зміни компонентного складу палива на процеси, що

мають місце в паливні котла, а саме при спалюванні природного газу (рис. 1, а) спостерігається формування стабільного факела з вираженою зоною максимальних температур у центральній частині топки. Пікові значення температур у ядрі факела досягають рівня 1650...1800 °С, що сприяє інтенсивній генерації термічних оксидів азоту, проте забезпечує високу щільність теплових потоків на екранні поверхні. У випадку переходу на біогаз (рис. 1, б), який характеризується наявністю значної частки баластних газів (CO_2), структура температурного поля зазнає суттєвих трансформацій. Спостерігається «розмиття» ядра факела та зниження пікових температур на 100...150 °С порівняно з природним газом. Це підтверджує висновки [3] щодо екологічних переваг біогазу, оскільки зниження температури в зоні активного горіння безпосередньо призводить до пригнічення реакцій утворення NO_x .

Аналіз рис. 1 також свідчить про те, що на обох візуалізаціях помітно вплив аеродинаміки пальників на заповнення об'єму паливні. У випадку біогазу (б) спостерігається дещо більша далекобійність факела, що зумовлено збільшенням масової витрати палива для підтримки номінальної потужності котла через нижчу калорійність біогенного газу. Це створює додаткове термічне навантаження на задній екран та потребує врахування при оцінці термомеханічної надійності трубної системи. Отримані дані візуалізації корелюють із результатами [5] щодо необхідності корекції розрахунків теплообміну, оскільки зміна конфігурації температурного поля безпосередньо впливає на коефіцієнт теплової ефективності екранів та температуру газів на виході з паливні.

На рис. 2 представлено результати чисельного моделювання локальної концентрації оксидів азоту (NO_x) у перерізі паливні котла ДКВР-10-13. Візуалізація дозволяє простежити механізм формування токсичних викидів залежно від типу палива. При спалюванні природного газу (рис. 2, а) спостерігається інтенсивне утворення NO_x безпосередньо в зоні активного горіння (ядра факела), де температури є максимальними. Високі локальні концентрації оксидів азоту чітко корелюють із раніше проаналізованим температурним полем (рис. 1, а), що підтверджує домінування механізму утворення «термічних» NO_x . Максимальні значення концентрацій зосереджені по осі пальника, що створює високе екологічне навантаження на виході з паливні. У випадку використання біогазу (рис. 2, б) картина розподілу суттєво змінюється в бік зменшення емісії. Наявність у складі біогазу діоксиду вуглецю

(CO₂), який виступає як інертний розріджувач, призводить до зниження середньої температури горіння та зменшення концентрації реагуючих компонентів. Це зумовлює значне скорочення зон інтенсивного утворення оксидів азоту. Отримані результати візуалізації узгоджуються з експериментальними даними [3], демонструючи можливість досягнення європейських екологічних стандартів без використання дорогих систем очищення димових газів.

Рис. 2, б також свідчить, що зона генерації NO_x є більш розтягнутою за довжиною топки порів-

няно з природним газом. Це пояснюється збільшенням об'ємної витрати біогазу та відповідною зміною кінетики хімічних реакцій. Попри більшу довжину зони реагування, абсолютні значення концентрації NO_x залишаються стабільно нижчими, ніж при спалюванні природного газу. Таким чином, результати моделювання підтверджують, що заміна природного газу на біогаз у котлах ДКВР-10-13 є ефективним методом деноксифікації, що дозволяє знизити екологічний вплив котла на прилеглі території.

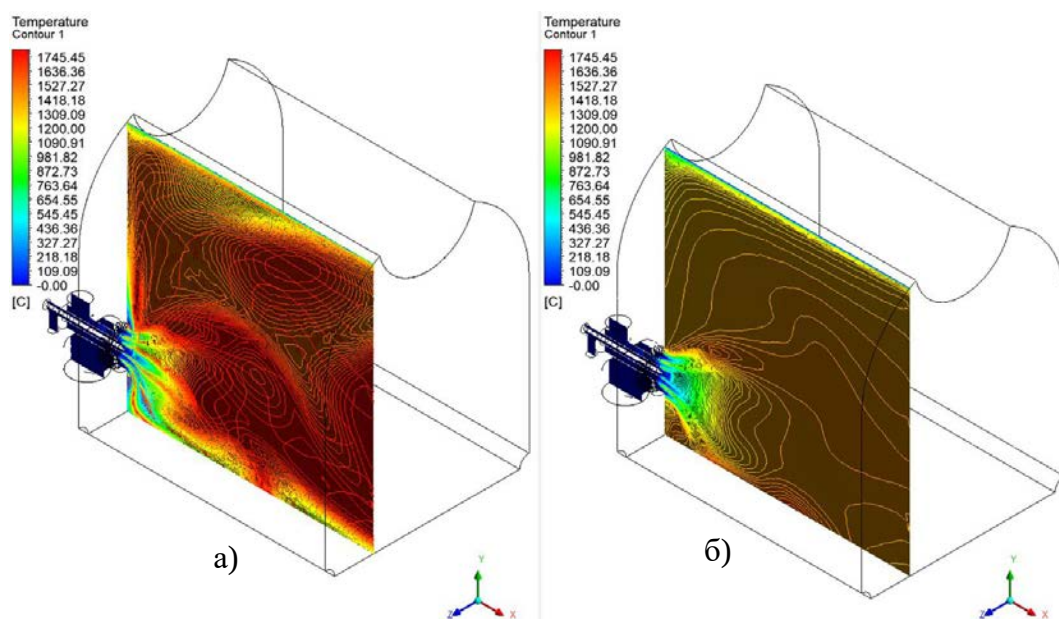


Рис. 1. Розподіл температур в перерізі паливні котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання природного газу (а) і біогазу (б)

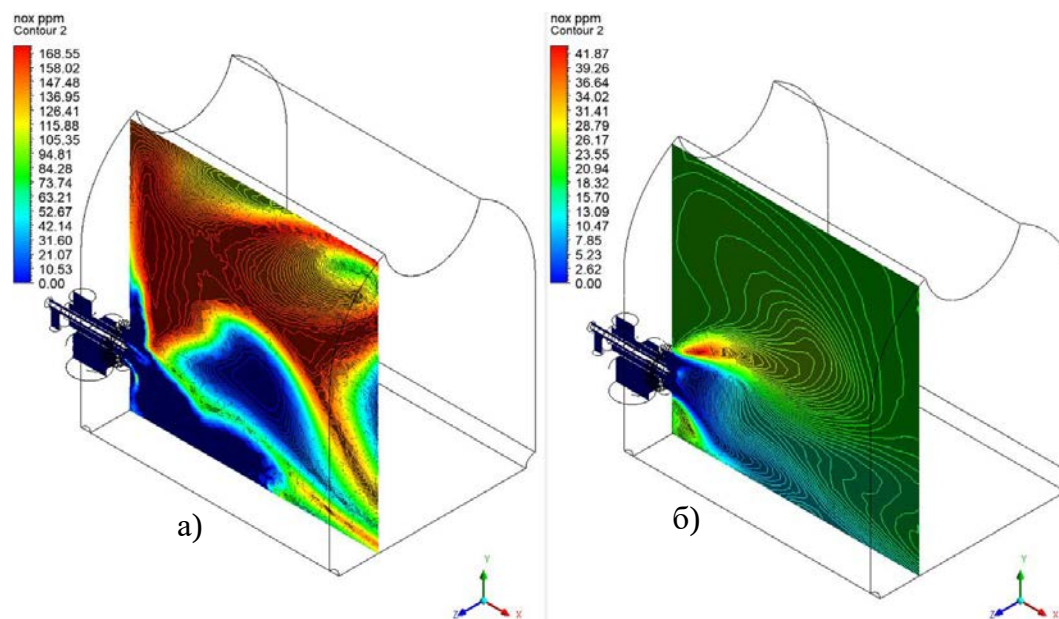


Рис. 2. Розподіл оксидів азоту в перерізі паливні котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання природного газу (а) і біогазу (б)

Щоб розрахувати екологічну ефективність, порівнюємо масові викиди вуглекислого газу (CO_2) при спалюванні вашого біогазу (60% CH_4 , 40% CO_2) та чистого метану (як аналога природного газу) у розрахунку на 1 ГДж отриманої енергії.

Таблиця 1

Масові частки викидів

Паливо	Об'єм для 1 ГДж ($1000/Q_H^p$)	Викид CO_2 на 1 ГДж
Метан	27,93 м ³	$27,93 \times 1,977 = 55,22$ кг
Біогаз	46,55 м ³	$46,55 \times 1,977 = 92,03$ кг

Прямі викиди: На рівні труби (stack emissions) біогаз демонструє на ~66% вищі викиди CO_2 на одиницю енергії порівняно з природним газом. Це пояснюється тим, що для отримання тієї ж кількості тепла потрібно спалити більше об'єму біогазу, який сам по собі вже містить вуглекислоту.

Аналіз доступно літератури свідчить, що біогаз вважається вуглецево-нейтральним паливом оскільки CO_2 , що виділяється при його спалюванні, раніше був поглинутий рослинами з атмосфери під час росту біомаси.

Оскільки об'єм димових газів на 1 ГДж у біогазу більший, це призводить до збільшення втрат теплоти з відхідними газами (q_2), що трохи знижує ККД котла порівняно з роботою на природному газі.

CFD-моделювання дозволяє визначити концентрацію CO_2 у факелі біогазу, при чому вона значно (приблизно в 2,5 рази) вища чим у випадку спалювання природного газу. Це посилює радіаційний теплообмін (через випромінювання трьохатомних газів), що частково компенсує нижчу температуру горіння біогазу.

Висновки. Аналіз отриманих даних свідчить про специфічний характер формування екологічних показників при експлуатації котла ДКВР-10-13 на біогазовому паливі. Проведені розрахунки показують, що питомі викиди діоксиду вуглецю на одиницю виробленої теплової енергії для біогазу становлять приблизно 92,03 кг/ГДж, що на 66% перевищує аналогічний показник для природного газу (55,22 кг/ГДж). Таке зростання прямих викидів CO_2 обумовлене двома факторами:

1. Наявністю баластного CO_2 у складі палива (31...40%), який не бере участі в енерговиділенні, але збільшує загальну масу вуглецю в продуктах згоряння.

2. Нижчою теплотою згоряння $Q_H^p \approx 21,5$ МДж/м³ проти 35,8 МДж/м³), що потребує спалювання більшого об'єму палива для забезпечення заданої теплової потужності агрегату. Однак, згідно з методологією оцінки життєвого циклу (LCA), біогаз класифікується як паливо з нульовим або близьким до нульового балансом викидів вуглецю. Це пояснюється біогенним походженням вуглецю: об'єм CO_2 , що виділяється в камері згоряння котла, еквівалентний об'єму, який був асимільований біомасою з атмосфери під час фотосинтезу.

З технічної точки зору, підвищена концентрація CO_2 у факелі біогазу має позитивний вплив на зниження емісії оксидів азоту (NO_x). Вуглекислий газ діє як інертний розріджувач, що знижує адіабатну температуру полум'я на 100...150 °C та інтенсифікує радіаційний теплообмін у топці. Це дозволяє досягти дотримання нормативів Директиви 2010/75/EU [2] без впровадження додаткових дорогих методів очистки димових газів, що робить переведення котлів ДКВР на біогаз екологічно виправданим кроком у межах стратегії декарбонізації енергетики України.

Список літератури:

1. Сапегін О., Гелетука Г. та ін. Аналіз розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні до 2050 року : звіт. 2021.
2. «Енергетичний Перехід» - найбільший виклик часу для України: веб сайт. URL: <https://ua.boell.org/uk/2017/11/15/energetichniy-perehid-naybilshiy-viklik-chasudlya-ukrayini>
3. Дубровський В. В., Шнирков П. В., Кузнецов О. Л. Дослідження викидів оксидів азоту при спалюванні суміші метану та вуглекислого газу в котлі ДКВР-6.5-13. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2022. № 4. С. 60–67. DOI: 10.33070/etars.4.2022.06.
4. Szkarowski A., Janta-Lipińska S., Gawin R. Reducing emissions of nitrogen oxides from dkvr boilers. Rocznik Ochrona Środowiska. 2016. Vol. 18, no. 1. P. 565–578.
5. Трубочев М. А., Белоусов В. В. Вплив термофізичних властивостей продуктів згоряння біогазу на теплові розрахунки водогрійних котлів. Вісник БДТУ ім. В.Г. Шухова. 2024. № 9 (10). С. 63–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71.
6. Liu H., Zhang J., Wu S. et al. Numerical simulation of biogas and coal co-combustion in a 300 MW tangential furnace. ACS Omega. 2024. DOI: 10.1021/acsomega.4c00885.
7. Hosseini S. E., Bagheri G. Numerical modeling of biogas diffusion flame in a swirl-stabilized boiler under oxy-fuel conditions. Energy. 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125206.

8. Karatas S., Derbentli T. Exergetic evaluations of oxy-biogas combustion in an adiabatic furnace. *International Journal of Thermodynamics*. 2023. DOI: 10.5541/ijot.1587174.
9. Yusaf T., Al-Ashaab A. CFD modeling of MILD combustion using biogas with exhaust gas recirculation (EGR). *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2688. 012023. DOI: 10.1088/1742-6596/2688/1/012023.
10. Saeed M., Khan S. Investigation of optimal biogas injection location in a bubbling fluidized bed boiler. *CFD Letters*. 2024. Vol. 17, no. 6. P. 69–80. DOI: 10.37934/cfdl.17.6.6980.
11. Szkarowski A., Janta-Lipińska S. Development of steam injection technology for NO_x reduction in DKVR 10-13 boilers. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 44. 00056. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400056.
12. Kuo K. K. *Principles of Combustion*. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2005. 732 p.
13. Peters N. *Turbulent Combustion*. Cambridge : Cambridge University Press, 2000. 304 p. (Cambridge Monographs on Mechanics).
14. Turns S. R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. 3rd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2011. 736 p.
15. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. *Transport Phenomena*. Revised 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2007. 928 p.
16. Versteeg H. K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Harlow : Pearson Education Limited, 2007. 517 p.
17. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 2024 R1. Canonsburg : ANSYS, Inc., 2024. 914 p.

Rachynskiy A.Yu., Baranyuk O.V., Tykhokhod V.O., Pikenin O.O. IMPROVEMENT OF RELIABILITY AND ENVIRONMENTAL SAFETY INDICATORS OF THE DKVR-10-13 BOILER DURING DIVERSIFICATION OF THE FUEL BASE

The article considers the current problem of modernization of boiler equipment of industrial and municipal energy of Ukraine in conditions of critical physical wear and the need to implement EU environmental directives on decarbonization. The object of the study is the processes of heat and mass transfer in fuel boilers DKVR-10-13 during the transition from natural gas to biogas. Using the method of numerical CFD modeling in the ANSYS environment, a comparative analysis of the processes that occur in fuel boilers during the combustion of methane and multicomponent biogas (67,76% CH₄, 31% CO₂) was carried out. The scientific novelty of the work lies in establishing the relationship between the ballast component of the fuel, the structure of temperature fields and the intensity of nitrogen oxide generation. The mathematical model was implemented on the basis of RANS equations, supplemented by the Realizable k-ε turbulence model and the Eddy-Dissipation Concept (EDC) chemical interaction model, which made it possible to take into account the influence of H₂ and H₂S on the combustion kinetics. It was found that the use of biogas leads to a “blurring” of the flare core and a decrease in peak temperatures by 100...150 °C, which ensures stable detoxication of combustion products without the introduction of purification systems. It was determined that despite the increase in direct CO₂ emissions by 66% (up to 92,03 kg/GJ) due to the lower calorific value of the fuel, the biogenic origin of carbon provides a zero carbon balance according to the principles of LCA. It was proven that the increased CO₂ concentration in the flare intensifies radiation heat exchange, partially compensating for the decrease in the combustion temperature. The modeling results also indicate an increase in the flare range when operating on biogas, which creates an additional thermal load on the rear screen and should be taken into account when assessing the low-cycle fatigue of the drum metal. The practical significance of the work lies in substantiating the technical feasibility and environmental feasibility of converting DKVR type boilers to alternative fuels within the framework of the energy independence strategy.

Keywords: DKVR boilers, biogas, CFD modeling, nitrogen oxides, decarbonization, temperature field, ANSYS, energy efficiency.

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Ткачов А.К.<https://orcid.org/0009-0008-7450-0733>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Яганов П.О.<https://orcid.org/0000-0001-7358-9846>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ФУНКЦІЇ ЛАМБЕРТА У МОДЕЛЮВАННІ ТМП СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА СПРОЩЕНОГО АНАЛІТИЧНОГО ПІДХОДУ

У роботі досліджено застосування аналітичних підходів для визначення точки максимальної потужності (ТМП) сонячного елемента. За результатами аналізу встановлено, що більшість аналітичних методів базуються на використанні функції Ламберта для аналітичних розрахунків параметрів ТМП. Використання подібних підходів дає змогу спростити методологію пошуку ТМП та суттєво скоротити час обчислень. Разом з тим, у дослідженні розглянуто можливість обчислення функції Ламберта в контролерах слідування за точкою максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking – MPPT) без апроксимацій. Показано, що реалізація такого підходу потребує значних обчислювальних ресурсів на базі потужних процесорів, що зумовлює їх підвищення вартості та енергоспоживання. Додатково проаналізовано методи апроксимації функції Ламберта, зокрема розклад у ряд, логарифмічну апроксимацію та розширену апроксимацію із застосуванням формули Шенкса. Такі підходи дозволяють знизити вимоги до обчислювальних засобів у MPPT-контролерах, проте навіть обчислення апроксимації вимагає значних ресурсів. На основі цього проведено дослідження альтернативних аналітичних методів знаходження ТМП та оцінено можливості їх практичного впровадження. Запропонований аналітичний метод ґрунтується на іншому принципі визначення параметрів ТМП і є більш придатним для реалізації на мікроконтролерах з обмеженими ресурсами. Попри необхідність застосування ітераційних алгоритмів для розрахунку, метод виявився значно ефективнішим за використання аналітичних виразів, побудованих на основі функції Ламберта. Отримані результати свідчать, що швидкодія такого підходу щонайменше у чотири рази перевищує відповідні показники для методів, що базуються на апроксимації функції Ламберта. Це відкриває можливість створення більш ефективних MPPT-контролерів на основі звичайних мікроконтролерних процесорів, що дозволяє зменшити собівартість та енергоспоживання відповідних систем.

Ключові слова: Сонячний елемент, MPPT, функція Ламберта, апроксимація.

Постановка проблеми. Сфера сонячної енергетики перебуває у стані активного розвитку, спрямованого на підвищення ефективності сонячних елементів та оптимізацію способів їх використання. Сонячні елементи як фізичні компоненти характеризуються нелінійною залежністю між напругою та струмом, а отже – і нелінійною характеристикою потужності від напруги. Оскільки для сонячного елемента не існує однозначної аналітичної формули, що точно описує його вольт-амперну характеристику (ВАХ), на практиці застосовують еквівалентні схеми замі-

щення. Однією з найпоширеніших є однодіодна модель, яка описує графік ВАХ із використанням рівняння Шоклі для струму через діод. Оскільки, у сонячних елементах враховуються також паразитні опори (послідовний та шунтовий), аналітичне визначення цієї залежності є досить складним завданням.

На початкових етапах розвитку сонячної енергетики точка максимальної потужності (ТМП) – тобто робоча точка, в якій добуток струму на напругу досягає максимуму, – визначалась за допомогою ітераційних алгоритмів. Такі

алгоритми (зокрема методи поступового наближення, сканування навантаження або інкрементальної провідності) потребують певного часу для встановлення режиму роботи в околі оптимальної точки. Це призводить до додаткових втрат, особливо за швидкозмінних умов освітленості чи температури, та знижує ефективність роботи фотоелектричних систем. Контролери, які підтримують робочу точку сонячного елемента під час роботи системи, отримали назву системи слідування за точкою максимальної потужності (ССТМП).

З подальшим розвитком галузі зросла увага до аналітичного визначення ТМП. Це зумовило більш детальне вивчення рівняння сонячного елемента в ТМП та виявлення певних обмежень класичних ітераційних методів щодо досягнення високого коефіцієнта корисної дії (ККД). Через наявність експоненційної змінної більшість аналітичних методів вирішуються за допомогою функції Ламберта, яка дозволяє спростити вигляд складних нелінійних рівнянь і отримати більш точні результати. Проте обчислення функції Ламберта потребує наявності спеціалізованих бібліотек та значних обчислювальних ресурсів, що підвищує вартість ССТМП. Крім того, використання цієї функції ускладнює реалізацію алгоритмів у мікроконтролерах з обмеженими ресурсами, що часто застосовуються у побутових та компактних сонячних системах.

Це стимулює пошук адаптивних та спрощених математичних моделей, які дозволяють зменшити обчислювальні витрати без значної втрати точності та забезпечують більш ефективну роботу фотоелектричних систем. Збереження високої точності при зниженні вимог до обчислень є ключовою задачею сучасного моделювання та керування сонячними елементами.

Таким чином, актуальною залишається задача критичного аналізу доцільності використання функції Ламберта при моделюванні ТМП сонячних елементів та пошуку спрощених підходів, що дозволяють зберегти достатню точність і одночасно зменшити обчислювальні витрати, підвищуючи загальну ефективність роботи фотоелектричних систем.

Метою цієї роботи є дослідження складності застосування функції Ламберта при аналітичному визначенні точки максимальної потужності сонячних елементів та обґрунтування доцільності використання альтернативних, простіших аналітичних методів, здатних забезпечити достатню точність результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За результатами огляду наукових джерел встанов-

лено, що більшість робіт, присвячених аналітичному визначенню точки максимальної потужності (ТМП) фотогальванічних систем, ґрунтуються на застосуванні функції Ламберта. Це пояснюється тим, що основою більшості досліджень є одnodіодна модель заміщення сонячного елемента, у якій виникає нелінійне рівняння з експоненційною залежністю струму від напруги. Використання функції Ламберта дозволяє подати це рівняння у явній формі та значно спростити подальший математичний аналіз, зокрема при визначенні ТМП.

Загалом зазначені методи спираються на дослідження математичної моделі вольт-амперної характеристики (ВАХ) одnodіодної схеми сонячного елемента. У низці робіт у модель включено шунтовий опір, однак існує також значна кількість публікацій, де цим параметром нехтують. Це обґрунтовується тим, що для більшості типових сонячних елементів величина шунтового опору на кілька порядків перевищує послідовний, а струм, що протікає через нього, є практично нульовим [1].

У дослідженні [2] запропоновано аналітичну формулу для визначення ТМП на основі одnodіодної моделі без врахування шунтового опору. Автори обґрунтовують низку спрощень, зроблених під час перетворень, доводячи їхній незначний вплив на кінцевий результат. Це дозволяє записати рівняння у формі, яку можна виразити через функцію Ламберта.

В іншій роботі [3] формула для визначення ТМП також була отримана із застосуванням функції Ламберта, проте, на відміну від попереднього дослідження, модель включає всі параметри одnodіодної схеми, зокрема шунтовий опір. Такий підхід забезпечує більш точне визначення ТМП.

У дослідженні [4] зосереджено увагу на спрощенні аргументу функції Ламберта шляхом перетворення та розширення одnodіодної моделі. За базовий об'єкт взято ідеальний сонячний елемент без послідовного та шунтового опорів. Формули для визначення струму й напруги в ТМП отримано шляхом поєднання ідеалізованої моделі з реальними параметрами послідовного та шунтового опорів.

Окремо слід відзначити альтернативний підхід [5], що не використовує функцію Ламберта. Він базується на аналізі поведінки струму та напруги безпосередньо в точці максимальної потужності. У разі, якщо один із параметрів може бути визначений з достатньою достовірністю, обчислення іншого значно спрощується. Автори подають цей метод як простішу альтернативу порівняно зі складними аналітичними перетвореннями.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження застосування аналітичних підходів для визначення точки максимальної потужності (ТМП) сонячного елемента

Виклад основного матеріалу. Сонячний елемент є складним фізичним компонентом і не має точного аналітичного опису. Внаслідок цього його вольт-амперна характеристика (ВАХ) є суттєво нелінійною. Проте, застосовуючи еквівалентні моделі заміщення, можна отримати наближене математичне представлення ВАХ. Найбільш розповсюдженою для сонячних елементів є одnodіодна модель заміщення, оскільки вона забезпечує моделювання поведінки ВАХ з досить високою точністю. Для одnodіодної моделі заміщення формула, що описує ВАХ такого сонячного елемента, наведена в рівнянні (1).

$$I = I_{kz} - I_0 \left(e^{\left(\frac{q(U + IR_s)}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Враховуючи наявність експоненційного члена, як було зазначено в попередньому розділі, у багатьох дослідженнях для знаходження ТМП застосовують функцію Ламберта. Вона дозволяє привести похідну рівняння (1) до вигляду з однією невідомою, що значно спрощує аналітичні обчислення.

Функція Ламберта $W(x)$ є математичним інструментом для розв'язання рівнянь виду $y = xe^x$. У контексті фотогальванічних систем, що містять сонячні елементи, її застосовують для аналітичного визначення ТМП через похідну рівняння (1). Завдяки властивостям цієї функції, нелінійне рівняння з експоненційним членом може бути приведене до простішої форми, що містить лише одну невідому і значно спрощує обчислення.

Цей математичний інструмент використовується практично майже у всіх дослідженнях, де аналітично визначають напругу або струм у точці максимальної потужності на основі похідної ВАХ. Вона забезпечує явну форму рішення, дозволяючи зменшити складність обчислень і отримати точні аналітичні результати для ТМП.

Графік функції Ламберта представлений на Рис.1. Фактично, ця функція є монотонно зростаючою для усіх значень x $[0...+\infty]$. Ця гілка має назву основної гілки функції Ламберта $W_0(x)$. Інша гілка, що є спадаючою на проміжку x $[-e^{-1}...0)$ використовується доволі рідко для спеціалізованих задач. Для визначення параметрів ТМП зазначених в статтях, аргумент функції $W(x)$ є завжди додатним, тому для цієї задачі визначальною є саме додатня гілка функції Ламберта $W_0(x)$.

В оригінальному вигляді функція Ламберта не виражається через елементарні функції, тому її аналітичне застосування обмежується спеціалізованими бібліотеками та математичними пакетами. Для обчислення $W(x)$ зазвичай використовують такі інструменти:

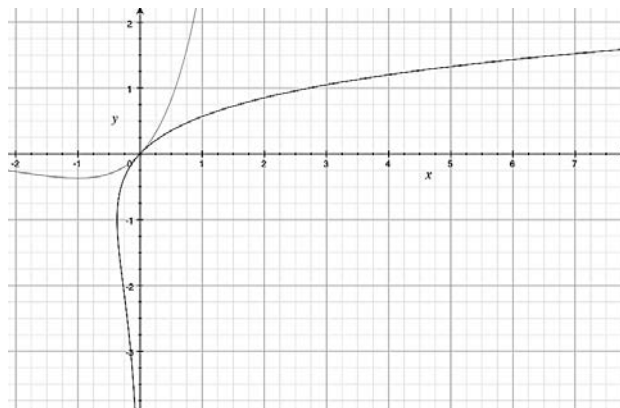


Рис. 1. Графік функції Ламберта

– Python / SciPy: функція `scipy.special.lambertw(z)` дозволяє обчислювати W-функцію для дійсних та комплексних аргументів.

– Matlab: функція `lambertw(k, x)` забезпечує обчислення будь-якої гілки функції Ламберта, включно з основною та від'ємною гілкою.

Для роботи з цими інструментами необхідна операційна система, яка їх підтримує, а також достатньо потужне апаратне забезпечення. Пряме обчислення W-функції для визначення ТМП фотогальванічного елемента часто є неефективним з точки зору обчислювальних ресурсів. Тому, незважаючи на те що такі бібліотеки забезпечують точний розв'язок, їх практичне застосування в реальних контролерах слідкування за ТМП є обмеженим.

Одним із способів обчислення функції Ламберта без апроксимації є застосування чисельних методів, таких як ітераційні алгоритми Нь'ютона–Рафсона або методи бісекції. Ці методи дозволяють знаходити значення $W(x)$ з довільною точністю для будь-якого дійсного або комплексного аргументу. Зокрема, для фотогальванічних систем і одnodіодної моделі, чисельне розв'язання похідної ВАХ дозволяє визначити точку максимальної потужності без спрощень у рівнянні.

Проте практичне використання чисельних підходів має суттєві обмеження. Для стандартних умов освітлення та температури аргумент функції Ламберта, що виникає у рівняннях ТМП, може бути дуже великим. Це часто призводить до переповнення пам'яті або виходу чисельного алгоритму за межі допустимих значень, особливо на

вбудованих системах або при обмежених обчислювальних ресурсах.

Через ці обмеження чисельні методи, хоча й забезпечують точний розв'язок, виявляються неефективними для практичного застосування в реальних системах управління сонячними елементами.

Для малих значень аргументу x ($|x| \ll 1$) функцію Ламберта можна представити у вигляді ряду Тейлора навколо точки $x=0$. Цей ряд отримується шляхом формального розв'язання рівняння $W(x)$ у вигляді степеневого ряду (2):

$$W(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-n)^{(n-1)}}{n!} x^n \quad (2)$$

Графік, що демонструє збіжність ряду для значень аргументу в околі точки $x=0$ показано на Рис.2. З цього графіку можна зробити висновок що використання цього методу для значень аргументу більших за 0.3 є неефективним.

Хоча розклад у ряд Тейлора ефективний для малих значень аргументу, у багатьох практичних застосуваннях фотогальванічних систем аргумент функції Ламберта може бути дуже великим. У таких випадках ряд Тейлора збігається повільно або взагалі не дає точного результату, тому для великих x використовують інші методи апроксимації.

Для великих значень x ($x \gg 1$) зазвичай використовують асимптотичні апроксимації. Вони ґрунтуються на перетворенні рівняння функції Ламберта (3) з використанням логарифмічних перетворень.

$$W(x)e^{W(x)} = x \quad (3)$$

У випадку великих x значення $W(x)$ також стає великим, і рівняння можна переписати у вигляді формули (4):

$$W(x) = \ln(x) - \ln(W(x)) \quad (4)$$

Застосовуючи ітераційний підхід, можна розширювати формулу (4) додаючи поправки до досягнення необхідної точності. Зазвичай, використовують від двох до трьох членів для обчислення функції Ламберта, оскільки подальше розширення буде сильно ускладнювати формулу. Формула з використанням трьох членів розкладу функції Ламберта наведена у виразі (5).

$$W(x) = \ln(x) - \ln(\ln(x)) + \frac{\ln(\ln(x))}{\ln(x)} \quad (5)$$

Ця форма забезпечує швидке обчислення функції Ламберта без залучення спеціалізованих бібліотек або чисельних алгоритмів, що спрощує аналітичне знаходження ТМП сонячного елемента. Відносна похибка у відсотках для великих значень представлено на Рис. 3.

Аналіз графіку показує, що така апроксимація забезпечує досить високу точність для великих значень аргументу функції Ламберта x . Водночас відносна похибка на всьому діапазоні $x \in [5, 1000]$ залишається невеликою – в межах 1%, що робить цю апроксимацію придатною для практичних розрахунків. Проте, використання цього підходу для значень $[1..5]$ є неефективною, оскільки в цьому діапазоні похибка розрахунків є досить суттєвою.

Взявши за основу формулу (4), автор [6] дослідив можливість заміни еквівалентного розкладу поправок логарифмічної апроксимації на суму членів ряду. Такий підхід дозволяє значно підвищити точність обчислення функції Ламберта, особливо для проміжних та великих значень аргументу, де стандартна логарифмічна апроксимація може давати помітну похибку. Заміна поправок на суму

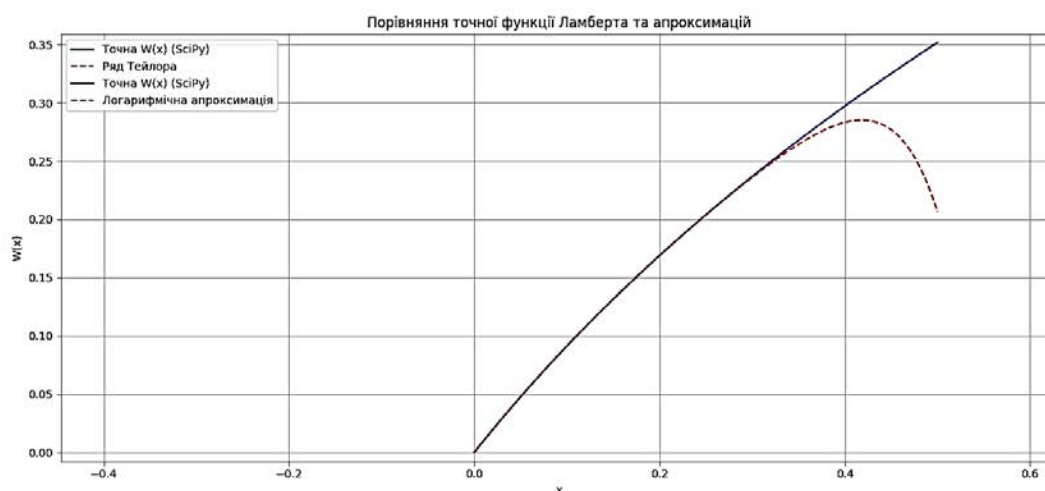


Рис. 2. Порівняння функції Ламберта та апроксимація рядом Тейлора в діапазоні x $[0..0.6]$

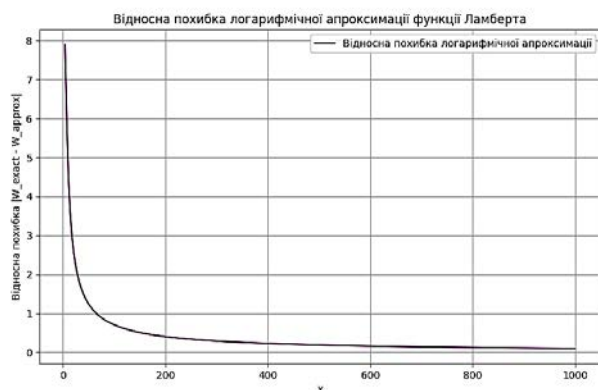


Рис. 3. Відносна похибка функції Ламберта логарифмічною апроксимацією для великих x

забезпечує кращу збіжність і дозволяє уникнути чисельних нестабільностей, що виникають при прямому використанні асимптотичних формул.

Формула, отримана в результаті дослідження демонструє значно вищу точність. Похибка на всьому діапазоні великих значень є значно меншою, ніж значення обчислене в результаті прямого асимптотичного розкладу. Це демонструє можливість обчислення значення функції Ламберта не ітераційним методом, проте формула (6) отримана в результаті перетворень має доволі вищу складність.

$$W(x) = P * \left(1 - \frac{3 + 3P + 2Q}{4P + 1} + \sqrt{\left(\frac{3 + 3P + 2Q}{4P + 1} \right)^2 - \frac{6Q}{4P + 1}} \right) \quad (6),$$

де $P = \ln(x)$, $Q = \ln(P) = \ln(\ln(x))$.

Графік, зображений на Рис.4. демонструє значне зменшення похибки якщо використовувати формулу (6) для обчислення функції Ламберта.

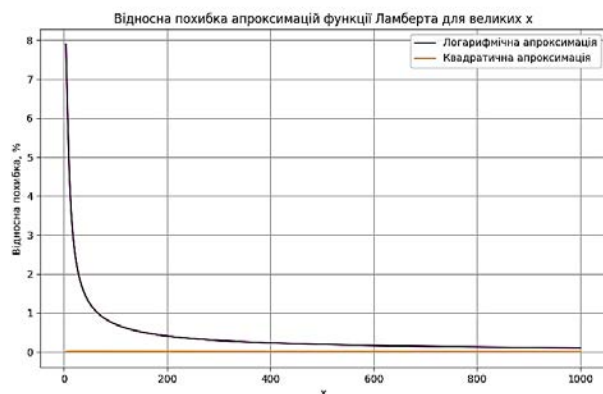


Рис. 4. Відносна похибка функції Ламберта логарифмічною апроксимацією та за формулою (6) для великих x

Попри високу точність формули (6), використання як формули (5), так і формули (6) у вбу-

дованих системах залишається досить обмеженим. Це пояснюється тим, що обчислення навіть одного логарифму є відносно складною операцією для процесорів мікроконтролерів. Наявність кількох логарифмів у цих формулах значно збільшує обчислювальне навантаження, що може призводити до зниження швидкодії та точності, особливо при обмежених ресурсах пам'яті та обчислювальної потужності. Тому для практичної реалізації вбудованих аналітичних моделей точок максимальної потужності зазвичай застосовують спрощені методи, які дозволяють уникнути прямого обчислення функції Ламберта, зберігаючи при цьому прийнятний рівень точності.

Авторами роботи [5] зазначено, що якщо один із параметрів (струм у точці максимальної потужності або напруга у точці максимальної потужності) є достовірним та може бути апроксимованим, то визначення другого параметра можна здійснити більш простим способом, ніж пряме використання функції Ламберта. Враховуючи недоліки обчислення функції Ламберта, це спрощення є досить ефективним для вбудованих систем.

Використавши формулу однодіодної моделі заміщення (1) без шунтового опору, для умови $dP/dV = 0$ у точці максимальної потужності (ТМП) рівняння струму-напруги можна перетворити та записати у вигляді рівняння (7), що визначає співвідношення між струмом і напругою у ТМП.

$$I_{mpp} - I_0 \frac{U}{n\phi_t} e^{\left(\frac{V + I_{mpp} R_s}{n\phi_t} \right)} = 0 \quad (7)$$

Після математичних перетворень запишемо формулу (7) як ітераційну формулу відносно напруги в точці максимальної потужності. В результаті отримано формулу (8) за якою ітераційним методом можна розв'язати трансцендентне рівняння.

$$V_{mpp} = n\phi_t \ln \frac{I_{mpp} n\phi_t}{I_0 U} - I_{mpp} R_s \quad (8)$$

Якщо одна із залежностей $U_{mpp}(E)$ або $I_{mpp}(E)$ є достовірною, та може бути апроксимована, знаходження іншого параметру є простішим ніж використання функції Ламберта. На основі наданих експериментальних даних з роботи [5] побудуємо графік залежності напруги в ТМП від освітленості на струм в ТМП від освітленості..

Графік наданих експериментальних даних та апроксимація по струму наведена на Рис.5. Аналізуючи представлений графік дійсно можна зробити висновок, що струм в ТМП можна апроксимувати прямою лінією, тоді як напруга в ТМП не має чіткого характеру залежності. Використовуючи фор-

мулу апроксимації струму за освітленості, можна обчислити напругу в ТМП за формулою (8).

Знаючи рівняння прямої $I(E)$ можна обчислити й напругу в ТМП. За цими експериментальними даними апроксимація прямої $I(E)$ може бути обчислена за формулою (9):

$$I_{\text{mpp}}(E) \approx 4.6663 \cdot E + 23.39 \quad (9)$$

З врахуванням що $I_{\text{mpp}}(E)$ є апроксимована та відома залежність, знаходження напруги в ТМП можна знайти за допомогою ітераційних методів для вирішення трансцендентного рівняння. Цей метод використовує на кожній ітерації лише один логарифм, що істотно зменшує навантаження на процесор, та не вимагає спеціалізованого і досить складного програмного забезпечення.

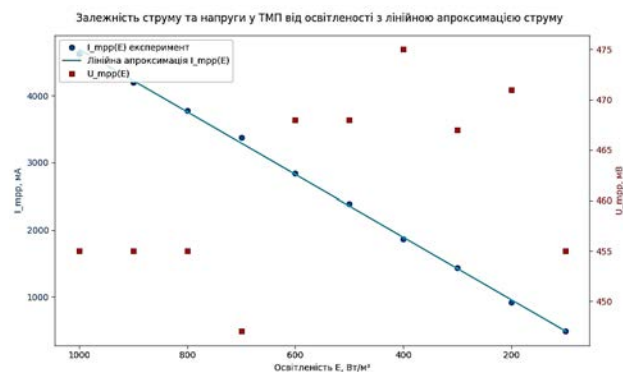


Рис. 5. Графік залежності струму і напруги в ТМП за експериментальними даними

Враховуючи попередні дослідження виконані з розрахунком функції Ламберта [7] виконаємо розрахунки ітераційним методом, та порівняємо отримані результати. Значення параметрів точки максимальної потужності, визначені за допомогою формули одностійної моделі заміщення, приймемо як еталонні (очікувані), оскільки вони отримані без додаткових спрощень, безпосередньо з вихідної моделі.

$E = 1000 \text{ Вт/м}^2$, $\alpha = 24.141 \text{ мВ}$, $I_0 = 8.38 \cdot 10^{-8} \text{ А}$, $R_s = 21 \text{ мОм}$ $I_f = 5226.76 \text{ А}$. Еталонне положення ТМП 0.434 В , розраховане значення за допомогою функції Ламберта 0.434 В .

$E = 800 \text{ Вт/м}^2$, $\alpha = 24.141 \text{ мВ}$, $I_0 = 8.38 \cdot 10^{-8} \text{ А}$, $R_s = 23 \text{ мОм}$ $I_f = 4183.64 \text{ А}$. Еталонне положення 0.439 В , розраховане значення за допомогою функції Ламберта 0.440 В .

$E = 600 \text{ Вт/м}^2$, $\alpha = 24.141 \text{ мВ}$, $I_0 = 8.38 \cdot 10^{-8} \text{ А}$, $R_s = 23 \text{ мОм}$ $I_f = 3140.52 \text{ А}$. Еталонне положення 0.452 В , розраховане значення за допомогою функції Ламберта 0.452 В .

За допомогою формули (9) обчисливши наближене значення струму в ТМП і підставивши його в формулу (8) отримаємо значення напруги в ТМП розрахованого ітераційним методом.

$E = 1000 \text{ Вт/м}^2 - 0.429 \text{ В}$, $E = 800 \text{ Вт/м}^2 - 0.436 \text{ В}$, $E = 600 \text{ Вт/м}^2 - 0.450 \text{ В}$.

Порівняння отриманих значень показує, що використання апроксимованої прямої струму та ітераційного методу є ефективним: різниця між розрахованою напругою та еталонним значенням не перевищує $4\text{--}5 \text{ мВ}$. При цьому загальна кількість ітерацій для розрахунку не перевищує $5\text{--}6$.

У дослідженнях зазначених вище [2,3,4] рівняння відносно одного з параметрів ТМП складається не тільки з одної функції Ламберта, а й містить інші операції в рівнянні. Через це навіть незначна похибка в обчисленні W -функції суттєво впливає на кінцевий результат. Отже, обчислене значення $W(x)$ повинно забезпечувати дуже високу точність, щоб гарантувати коректність отриманих параметрів.

Застосування формули (6) дозволяє отримати точний результат, проте її реалізація є досить складною з точки зору обчислень. Це призводить до підвищених вимог до апаратного забезпечення МРРТ-контролера, який має виконувати такі складні математичні операції в реальному часі. Крім того, у вищезгаданих дослідженнях аргумент функції Ламберта сам по собі має складну структуру, що додатково збільшує навантаження на обчислювальні ресурси контролера.

Замір часу виконання обчислення функції Ламберта за формулою (6) на сучасному процесорі показав значення приблизно $22\text{--}24 \text{ мкс}$, тоді як визначення точки максимальної потужності (ТМП) за спрощеною формулою (8) займає лише $5\text{--}6 \text{ мкс}$. Таким чином, використання запропонованого підходу дозволяє знаходити ТМП принаймні в чотири рази швидше, ніж одне лише обчислення функції Ламберта. Враховуючи наявність інших математичних операцій у рівняннях для ТМП, час обчислень із застосуванням W -функції може бути ще суттєво більшим, що підкреслює важливість оптимізації алгоритмів для вбудованих МРРТ-контролерів.

Додатковою перевагою спрощеного методу є те, що він не потребує високоточних чисельних методів чи ітерацій, які притаманні обчисленню W -функції, а використовує лише елементарні операції (логарифм, множення, ділення), доступні навіть у контролерах з обмеженими обчислювальними ресурсами. Це робить його більш стабільним і надійним, оскільки відпадає необхідність у виборі гілки W_0 чи W_{-1} , що може призводити до чисельної нестабільності. Крім того, метод можна реалізувати у режимі одинарної точності (float), зменшуючи навантаження на пам'ять і енергоспоживання. У випадках обробки великих масивів даних чи моніторингу цілих фотомодулів це забезпечує додаткову масштабованість і ефективність.

Такий підхід дозволяє ефективно визначати ТМП у вбудованих системах з обмеженими ресурсами, забезпечуючи достатню точність для практичних застосувань фотогальванічних систем.

Висновки. У цьому дослідженні проведено огляд існуючих аналітичних методів визначення точки максимальної потужності (ТМП) сонячного елемента. Більшість таких методів базуються на використанні функції Ламберта для визначення параметрів у ТМП. Проведено аналіз складності її застосування, існуючих методів обчислення та їхніх недоліків, що дозволило зробити висновок про обмежену ефективність використання функції Ламберта у вбудованих системах.

Розглянуто альтернативний підхід визначення ТМП у випадку, коли один із параметрів (струм або напруга) відомий. Він передбачає застосування ітераційного методу, при цьому кількість ітерацій для досягнення точності 10^{-7} не перевищує 5–6. Використання цього методу в контролерах МРРТ

підвищує ефективність систем та знижує вимоги до обчислювальної потужності. Завдяки відсутності необхідності обчислення складних функцій, метод може бути впроваджений у прості мікроконтролери на базі STM32 або на аналогічні системи.

Запропонований ітераційний підхід також дозволяє значно скоротити час обчислень, що критично для систем із реальним часом роботи. Метод забезпечує достатню точність для практичних застосувань фотогальванічних систем, зберігаючи простоту реалізації на апаратному рівні. Це відкриває можливості для застосування методу у компактних автономних енергосистемах, портативних сонячних пристроях та вбудованих контролерах МРРТ для побутових і промислових застосувань.

Список літератури:

1. Singh & Ravindra -Analysis of series and shunt resistance in silicon solar cells using single and double exponential models - <https://doi.org/10.1680/EMR.11.00008>
2. Tirado-Serrato, J. G., Sanchez Garcia, A., & Maximov, S. Analytical Computation of the Maximum Power Point of Solar Cells Using Perturbation Theory.
3. E. I. Batzelis, I. A. Routsolias, and S. A. Papathanassiou, "An explicit PV string model based on the Lambert W function and simplified MPP expressions for operation under partial shading," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 1, pp. 301–312, 2015, doi: 10.1109/TSTE.2013.2272299.
4. E. I. Batzelis, G. E. Kampitsis, S. A. Papathanassiou and S. N. Manias, "Direct MPP Calculation in Terms of the Single-Diode PV Model Parameters," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 1, pp. 226-236, March 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2356017.
5. Volodymyr Chernenko, Petro Yahanov, Demyd Pekur, Roman Korkishko, Vasyl Kornaga, Viktor Sorokin, Analytical model of light current-voltage characteristics of a solar cell based on experimental data, Solar Energy Advances, Volume 4, 2024,100073, ISSN 2667-1131. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2024.100073>
6. Ольшанський В. П. Про апроксимацію функції Ламберта / В. П. Ольшанський // Наукові записки. – 2020. – Вип. 1. – С. 9. – DOI: 10.20998/2222-0631.2020.1.09. – УДК 517.5.
7. Ткачов А., Яганов П. (2026). Система слідування за точкою максимальної потужності сонячного елемента для акумуляторних батарей. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 361 (1), 470-477. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-65>

Tkachov A.K., Yahanov P.O. ANALYSIS OF THE USE OF THE LAMBERT FUNCTION IN MODELING THE MAXIMUM POWER POINT OF SOLAR CELLS AND A SIMPLIFIED ANALYTICAL APPROACH

The paper investigates the application of analytical approaches for determining the maximum power point (MPP) of a solar cell. The analysis revealed that most analytical methods are based on the use of the Lambert function for calculating MPP parameters. The use of such approaches makes it possible to simplify the methodology of MPP tracking and significantly reduce computation time. At the same time, the study examined the possibility of directly applying the Lambert function in Maximum Power Point Tracking (MPPT) controllers. It was shown that the implementation of this approach requires considerable computational resources, which in turn leads to increased cost and power consumption of systems based on high-performance processors. Additionally, methods of approximating the Lambert function, such as series expansion, logarithmic approximation, and extended approximation using the Shanks transformation, were analyzed. These approaches reduce the requirements for computational resources in MPPT controllers, but still remain relatively resource-intensive. Based on this, alternative analytical methods for determining the MPP were investigated and their practical implementation potential was evaluated. The proposed analytical method relies on a different principle of MPP parameter determination and is more suitable for implementation on microcontrollers with limited resources. Although this method requires iterative algorithms, it proved to be significantly more efficient than analytical expressions based on the Lambert function. The obtained results demonstrate that the performance of this approach is at least four times higher compared to methods based on the approximation of the Lambert function. This opens up the possibility of developing more efficient MPPT controllers using conventional microcontroller processors, thereby reducing both the cost and power consumption of such systems.

Keywords: Solar cell, MPPT, Lambert function, approximation.

Дата першого надходження статті до видання: 07.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Фатєєва К.О.

<https://orcid.org/0009-0009-0781-0034>

Одеський національний технологічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ В ПРОЦЕСАХ ЕКСТРАГУВАННЯ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН ІЗ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглядається проблема ефективного отримання та використання екстрактів біологічно активних речовин із рослинних матеріалів за використання різних методів екстрагування. Основна увага роботи зосереджується на екстрактах, що передбачаються використовувати у сільському господарстві для підвищення стійкості рослин. Застосування інноваційних методів екстракції, одним з яких є мікрохвильова екстракція як нетоксичний та сталий метод, забезпечує більш екологічний продукт, який не містить небезпечних хімічних речовин. Встановлено за результатами аналітичного огляду, що використання нових та комбінованих технологій підвищує екстрагованість, а також до зменшення кількості домішок у кінцевому екстракті та збереження термочутливих сполук при зниженні енергоспоживання. Наведені визначальні умови екстрагування, яких необхідно дотримуватись незалежно від методу. Обговорені результати використання методу мікрохвильового екстрагування при вилученні біологічно активних речовин з різної сировини. Продемонстровано, що метод мікрохвильової екстракції дозволяє досягти високої концентрації біологічно активних речовин за оптимальних умов співвідношення твердої речовини до розчинника. Визначено, що мікрохвильова екстракція без розчинників також може бути виконана з використанням залишкової води рослинного матеріалу, що мінімізує додаткові реакції. Наведені приклади ефективного використання мікрохвильового поля в екстрагуванні різних речовин з зазначенням потужності мікрохвильового поля, розчинника та часу. Обговорено застосування рослинних екстрактів для покращення стійкості рослин та їх відновлення. Запропонована методика проведення лабораторних досліджень ефективності мікрохвильового екстрагування біологічно активних речовин з суміші кропиви, хвоща та люцерни для розсади томатів. Мікрохвильовий режим повинен бути організований таким чином, щоб температура не перевищувала 60–65 °С, переважними є імпульсні режими.

Ключові слова: екстракт, ефективність, температура, потужність мікрохвильового поля, технічні умови, методика досліджень.

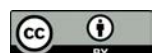
Постановка проблеми. Зіткнувшись із серйозними екологічними викликами нашого часу, такими як порушення клімату, руйнуванням біорізноманіття, забрудненням ґрунту та води – органічне землеробство є важливим рішенням на майбутнє, як показано в дослідженнях Кузьменко О. Б. [1], Павленко О. М. [2], Нікумані К. та Арвінду Й. [3]. Споживачі, які все більше усвідомлюють проблеми громадського здоров'я та навколишнього середовища, віддають перевагу органічним продуктам, створюючи тим самим нові можливості для фермерів у перехідному періоді. У цьому контексті рослинні екстракти та ефірні олії є особливо перспективними природними альтернативами, як показано в дослідженні Тайрусу М. та ін. [4]. Ці рішення, отримані з ретельно відібраних рослин завдяки їхнім захисним та стимулюючим

властивостям, дозволяють досягти наступного:

- значного скорочення використання хімічних речовин
- збереження ґрунтового життя та біорізноманіття
- підтримку задовільної врожайності
- гарантію якості продукції

Недавні дослідження Годлевської К. [5], Чоудхарі М. [6], Пател Р. [7] показують, що перехід на ці природні рішення не тільки технічно можливий, але й економічно доцільний. Дійсно, хоча початкові інвестиції можуть здаватися значними, зниження витрат на виробництво та підвищення цінності органічних продуктів зазвичай забезпечують вищу прибутковість з другого чи третього року.

Задачею роботи є розкриття перспектив застосування мікрохвильового нагріву в процесах екс-



трагування біологічно активних речовин із рослинних матеріалів на підставі аналізу сучасних наукових досліджень, що сприяє вирішенню проблеми ефективного отримання та використання екстрактів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Традиційне сільське господарство після десятиліть інтенсивного використання хімічних речовин тепер демонструє обмеження. Нещодавні дослідження виявляють негативні наслідки:

- середня втрата 1,2% органічної речовини в сільськогосподарських ґрунтах на рік (Райлі Х. [8], Е. Заєць [9]);
- скорочення популяцій комах на 75% протягом 30 років (Р. ван Клінк [10]);
- залишки пестицидів виявлені у 72% звичайних фруктів та овочів (Frank R. [11], G. M. Teló [12]);
- зростання забруднення ґрунтових вод нітрами та пестицидами (Ліхо О. А. [13], Л. Л. Березюк [14]).

Для усунення розглянутих негативних явищ пропонується використання екстрактів з біологічно активними речовинами, які вилучаються з рослинних матеріалів. З огляду на ці спостереження, природні рішення, такі як рослинні екстракти, виступають як надійна та необхідна альтернатива.

Першим кроком у виділенні та очищенні біоактивних сполук з рослинного матеріалу є екстракція – Джа А. К. [15], (рис. 1). Екстракція вторинних метаболітів, таких як фенольні кислоти та флавоноїди, є складною через їхню нерозчинну природу. Хоча традиційні методи екстракції, такі як метод Сокслета, нагрівання з рефлюксом та мацерація, є успішними процедурами екстракції біоактивних сполук, обладнання, що використовується в цих методах, відрізняється один від одного. Для екстракції біоактивних сполук з рослинних тканин слід використовувати відповідну техніку екстракції, яка поєднує якість продукту, ефективність процесу, виробничі витрати та екологічно прийнятні методи.

Застосування інноваційних методів екстракції в харчовій промисловості було ретельно досліджено через зростання очікувань споживачів щодо більш екологічних варіантів, які не містять небезпечних хімічних речовин, а також занепокоєння промисловості щодо сталих, нетоксичних методів екстракції. Інноваційні технології, такі як високий гідростатичний тиск (ВГТ), ультразвук (УЗ), імпульсне електричне поле (ІЕП), надкритична рідина (НР) та інші, все частіше замінюють традиційні методи. Використання нових та комбінованих технологій підвищує екстрагованість,

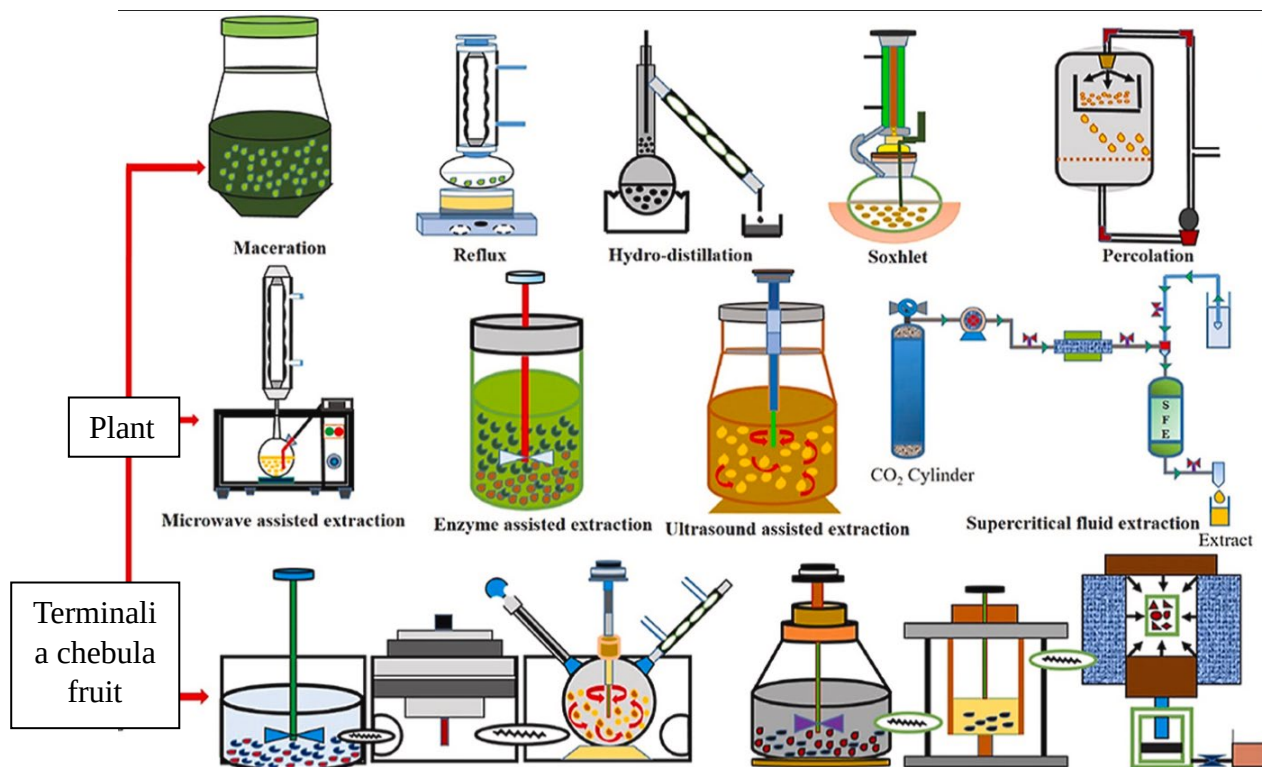


Рис. 1. Вилучення біологічно активних сполук із рослинної сировини з використанням комбінації різних нових методів [15]

що призводить до виходу з вищими показниками екстракції. Це також призводить до зменшення кількості домішок у кінцевому екстракті та збереження термочутливих сполук, використання різних неорганічних розчинників та низького енергоспоживання. Метою цього огляду є оцінка ефективності різних традиційних, нових та комбінованих технологій, що використовуються для екстракції біологічно активних сполук з рослинних матеріалів.

Порівняння методів екстракції з боку економічної доцільності відповідно даним Адрієн [16] та Багдіян Б. [17] наведено в табл. 1.

Таблиця 1
**Порівняння методів екстракції
з рослинної сировини**

Метод	Тривалість	Рослини	Питомі витрати
Мацерація	18-24 год	Кропива, живокіст	€0,15/л
Відвар	45 хв	Хвощ, папороть	€0,35/л
Ферментація	10-12 днів	Деревій, ромашка	€0,20/л
МАЕ	5 хв	Гарпагофітум	€0,30/л

Незалежно від методу екстрагування, слід дотримуватись наступних правил, викладених в роботі Д. Торрес-Ортіс та ін. [18]: не використовувати хлоровану воду, тому що вона нейтралізує ферменти; запобігати впливу ультрафіолетового випромінювання під час зберігання – це приводить зниженню ефективності екстрагування на 40%; не припускати змішування компонентів, які вступають в молекулярний антагонізм, при якому одна речовина зменшує або повністю скасовує дію іншої речовини шляхом взаємодії на молекулярному рівні (наприклад: кропиву та папороть). Також неприпустимо використання об'єму листів більш за 10% та при застосуванні методу ферментації – не перевищувати температуру 25°C. Мікрохвильова екстракція, як стверджують А. А. Закі та ін. [19], також є ефективною зеленою технологією, яка стала одним з основних методів екстракції біологічно активних компонентів зі складних рослинних препаратів.

Постановка завдання. Метою роботи є вивчення ефективності використання енергії мікрохвильового поля в процесі екстрагування біологічно активних речовин з рослинних матеріалів для їх подальшого використання в сільському господарстві.

Виклад основного матеріалу

Технічні умови використання мікрохвильової екстракції

У дослідженні Багдіян Б. та ін. [17] гарпагофітум екстрагували за допомогою звичайних ультраз-

вукових (UAE) та мікрохвильових (MAE) методів. Оптимальні умови MAE були наступними: етанол, співвідношення тверда/рідина 1/2,5, потужність мікрохвиль 100 Вт, час екстракції 5 хв. За оптимальних умов, вміст цільового компоненту (ЦК) в екстракті становив 10,50% (мас./мас.). Оптимальні умови UAE були: етанол, співвідношення тверда/рідина 1/2,5 та час екстракції 10 хв. За цих оптимальних умов, вміст ЦК в екстракті становив 10,88% (мас./мас.). MAE та UAE, розроблені в цьому дослідженні, є перспективними методами відповідно до сталого розвитку.

Мікрохвилі, як електромагнітні хвилі з частотою від 300 МГц до 300 ГГц, відповідають за нагрівання речовин за допомогою комбінації іонної провідності та дипольного руху Хорікоші С. та ін. [20]. Розчинники, такі як вода, що мають високу діелектричну проникність, можуть поглинати та вивільняти мікрохвильову енергію, що, в свою чергу, підвищує температуру, необхідну для збільшення швидкості екстракції. В дослідженні Сімсека та ін. [21] фенольні компоненти (сирингова, ванільна, епікатехін, гентизинова та кверцетин) були виділені з вишневого вичавку за допомогою MAE. Конденсовані таніни та поліфеноли були ефективно екстраговані з виноградних відходів за допомогою оптимізованого MAE в роботі Брахім, М. та ін. [22]. Чисті екстракти поліфенольного пігменту беталаїну були отримані зі шкірки плодів індійської опунції Сірімінною та ін. [23] за допомогою MAE (1 год при 70 °C). Ліазід та ін. [24] використовували MAE для екстракції антоціанового пігменту з виноградної шкірки та виявили, що екстракт антоціану демонструє більшу стабільність за температури 100 °C. Однак, вище цієї температури, вихід екстракту та стабільність знижувалися, що свідчить про розпад молекули. Аналогічно, К. Торрес-Леон та ін. [25] продемонстрували, що MAE може екстрагувати високу концентрацію біологічно активних речовин з насіння манго за оптимальних умов співвідношення твердої речовини до розчинника 1/60 г/мл. Поряд з цим, мікрохвильова екстракція без розчинників також може бути виконана з використанням залишкової води рослинного матеріалу, що мінімізує додаткові реакції гідролізу. Екстракцію кисневмісних сполук без розчинників з олії кардамону (*Elletaria cardamomum* L.) виконали та оптимізували Луккезі та ін. [26]. В іншій роботі Мішель та ін. [27] виконали MAE на основі прямого опромінення для виділення полярних антиоксидантних компонентів з морських ягід (*Hipporphae rhamnoides*) з використанням залишкового вмісту води. Порівняно зі звичайною екстракцією Сок-

слета, швидкий метод екстракції двох основних капсаїциноїдів з перцю хабанеро за допомогою нових методів екстракції на основі ультразвуку, ближнього інфрачервоного або мікрохвильового випромінювання призвів до вищого загального виходу та вищого співвідношення капсаїцину до дигідрокапсаїцину, що показано у дослідженнях Х. Мартінеса та ін. [28]. З досвіду авторів, МАЕ вважається цінною альтернативою традиційним методам екстракції численних біологічно активних сполук із сирих рослин та побічних продуктів. Основними перевагами МАЕ є вищий вихід екстракції та коротший час екстракції. Приклади ефективного використання мікрохвильового поля в екстрагуванні наведені в табл. 2.

Застосування рослинних екстрактів для покращення стійкості рослин та їх відновлення

Рослинні екстракти широко застосовують для підвищення стійкості рослин та відновлення після стресу. Як біостимулятори та адаптогени, рослинні екстракти підвищують стійкість до посухи, холоду та спеки, допомагають відновитися після гербіцидного стресу, посилюють імунітет до хвороб, прискорюють ріст коріння та листя, покращують фотосинтез та обмін речовин. Рослинні

екстракти є сумішшю різних біологічно активних речовин, яка може містити фітогормони (ауксини, цитокініни), фенольні сполуки, флавоноїди, амінокислоти, вітаміни, антиоксиданти. У комплексі активують захисні механізми рослини. Екстракти, що найчастіше використовуються для поліпшення стійкості рослин і їх відновлення (табл. 3).

Рослинні екстракти активують антиоксидантні ферменти, стабілізують мембрани клітин, регулюють водний баланс, знижують накопичення активних форм кисню. Вони підвищують адаптацію, що не є примусовим прискорювачем зростання. Їх застосовують в обробці насіння, для листового підживлення, а також для відновлення після заморозків, посухи та обробок хімікатами.

Важливо відзначити, що ефект залежить від концентрації та якості екстракту і краще працюють суміші, а не поодинокі речовини. У табл. 4 наведено методи використання рослинних екстрактів у сільському господарстві.

Методика проведення лабораторних досліджень на розсаді томатів

Як приклад досліджень ефективності дії мікрохвильових екстрактів розглядається їхній вплив на зростання розсади томатів. Рослинний

Таблиця 2

Приклади ефективного використання мікрохвильового поля в екстрагуванні

Рослина/ Матеріал	Екстрагована речовина	Оптимальні умови / результати
<i>Scutellaria baicalensis</i> і <i>S. lateriflora</i>	Феноли, флавоноїди, антиоксиданти, протизапальні речовини	Мікрохвильова потужність ~63 Вт, час ~10 хв, 70 % етанолу давали найвищі показники фенолів, сильну антиоксидантну та LOX-інгібууючу дію [29]
<i>Rosmarinus officinalis</i> (розмарин)	Біоактивні речовини із листя	Найкращий розчинник — етиловий спирт 80 %, потужність 720 Вт, час ~6.5 хв. [30]
<i>Mentha piperita</i> (м'ята перцева)	Феноли, флавоноїди, хлорофіли, загальний антиоксидантний потенціал	Після обробки мікрохвилями значно зросла концентрація фенолів (порівняно з необробленими зразками) [31]
<i>Moringa oleifera</i> насіння	Олія, зокрема жирні кислоти	МАЕ скоротило час екстракції з ~8 годин (традиційний метод) до ~1 години; одержано ~42 % вихід олії при оптимальних умовах (співвідношення твердого/рідкого, потужність, температура) без значної зміни складу жирних кислот [32]
<i>Cinnamomum iners</i> листя	Поліфеноли, загальна антиоксидантна активність	Оптимум: час ~24-25 хв, потужність ~150-250 Вт, співвідношення рослина:розчинник (solid:liquid) близько 1:60–1:130, 50-70 % етанолу. Зниження IC ₅₀ (краще антирадикальна активність) [33]

Таблиця 3

Екстракти, що найчастіше використовуються для поліпшення стійкості рослин і їх відновлення

Рослинний матеріал	Цільові компоненти	Результат
Люцерна	Тріаконтанол, цитокінінів	природний жирний спирт, що посилює фотосинтез та зростання рослин. [34]. Покращує фотосинтез та зростання
Хвощ польовий	кремнієва кислота	Підсилює клітинні стінки, підвищує стійкість до грибкових захворювань, знижує стрес від посухи [35].
Кропива	Мікроелементи, органічні кислоти	допомагає відновленню після пошкоджень [36]
Часник, верба	саліцилат	Стимулюють імунну відповідь [37]

Методи використання рослинних екстрактів у сільському господарстві

Застосування	Ступінь розведення	Метод використання
Листове оброблення	1:10	обприскування вранці або ввечері без прямого сонця до змочування листа 1 раз на 7–14 днів
Полив під корінь	1:5	Полив 0,5–1 л на рослину після звичайного поливу 1 раз на 2–3 тижні
Розсада та стресовані рослини	1:20	Полив після пересадки розсади, після заморозків, обробки пестицидами, при посуші або перегріві, уповільнення росту.

екстракт на основі кропиви, хвоща та люцерни надає стимулюючу та адаптогенну дію на рослини томату, підвищуючи ростові показники та стійкість до стресу. Згідно дослідженням Мурада А. А. та ін. [38], для томатів рекомендується комбінований рослинний екстракт на основі кропиви для харчування та відновлення рослини, хвоща польового для посилення стійкості до хвороб та люцерна, що посилює ріст та фотосинтез.

При застосуванні мікрохвильової обробки підготовлену сировину спочатку обробляють у мікрохвильовому полі для руйнування целюлозної тканини та інтенсифікації виходу цільового компонента при подальшій екстракції. Мікрохвильовий режим повинен бути організований таким чином, щоб температура не перевищувала 60–65 °С. Переважними є імпульсні режими.

Для досліджень рекомендуються екстракти з розведенням 1:20, 1:10 та 1:5 при мікрохвильовій та традиційній підготовці сировини, контроль – обробка розсади водою. Співвідношення компонентів, що рекомендується, наступне: кропива – 50 г, хвощ – 30 г, люцерна – 20 г (на 1 л води).

Для вирощування розсади рекомендуються наступні умови: температура 22–25 °С, фотоперіод 14 год, вологість 60–70%.

Обробка полягає в листовому обприскуванні до повного змочування листа 1 раз на 7 днів, тривалістю 21 день. Необхідно фіксувати такі показники: висота рослини, довжина кореня, суха та сира маса.

Під час підготовки сировини свіже листя та стебла слід очистити від гнилі та забруднень, потім 100 г подрібненої свіжої сировини або 20 г

сухої сировини залити 1 літр дистильованої води з температурою 30–40 °С.

Для контролю ефекту через 5–10 днів оцінюють колір листя, тургор, швидкість зростання та появу нового листя.

Можливі помилки при використанні екстрактів полягають у надто високій концентрації, обробці в спеку, зберіганні екстракту більше 48 годин, змішуванні з агресивною хімією.

Висновки. Методи МАЕ з певними робочими умовами можуть бути ефективно використані для екстракції рослин, при цьому продуктивність МАЕ залежить від правильного налаштування обладнання та процедури екстракції з оптимізованими робочими параметрами. Система МАЕ вважається перспективним методом екстракції рослин.

Мікрохвильове екстрагування має значний потенціал завдяки швидкості та селективності, однак нерівномірний нагрів, обмежена глибина проникнення та низький ККД істотно стримують його широке промислове застосування. Для подолання цих проблем необхідні оптимізація конструкції апаратів, комбінування з іншими методами нагріву, точний контроль параметрів процесу.

При застосуванні мікрохвильової обробки підготовлену сировину спочатку обробляють у мікрохвильовому полі для руйнування целюлозної тканини та інтенсифікації виходу цільового компонента при подальшій екстракції. Мікрохвильовий режим повинен бути організований таким чином, щоб температура не перевищувала 60–65 °С. Переважними є імпульсні режими.

Список літератури:

1. Кузьменко О. Б. Органічне землеробство як фактор євроінтеграції України. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2013. № 3. С. 151–155. <https://doi.org/10.31210/visnyk2013.03.32>.
2. Павленко О. Органічне землеробство як механізм забезпечення сталого продовольчого виробництва. Bulletin of Sumy National Agrarian University. 2025. № 1 (101). С. 15–19. <https://doi.org/10.32782/bsnau.2025.1.3>.
3. Nikumani C., Arvind Y. Organic Agriculture: Conventional farming vs organic farming. 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4971958>.
4. Tyrus M., Lykhochvor V., Olifir Y. Green mass of amaranth as an alternative of mineral fertilizers. Foothill and mountain agriculture and stockbreeding. 2024. Vol. 75, no. 1. P. 120–131. [https://doi.org/10.32636/01308521.2024-\(75\)-1-11](https://doi.org/10.32636/01308521.2024-(75)-1-11).

5. Godlewska K., Ronga D., Michalak I. Plant extracts – importance in sustainable agriculture. *Italian Journal of Agronomy*. 2021. Vol. 16, no. 2. <https://doi.org/10.4081/ija.2021.1851>.
6. Chaudhary M. V., Thakur N. Future Prospects of Organic Farming: A Review. *Bhartiya Krishi Anusandhan Patrika*. 2021. <https://doi.org/10.18805/bkap274>.
7. Patel R., Makwana V. M. Natural Organic Compounds in Organic Farming: Roles, Mechanisms, and Future Prospects – A Narrative Review. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2026. Vol. 16, no. 1. <https://doi.org/10.33263/briac161.002>.
8. Riley H., Bakkegard M. Declines of soil organic matter content under arable cropping in southeast Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Plant Soil Science*. 2006. Vol. 56, no. 3. P. 217–223. <https://doi.org/10.1080/09064710510029141>.
9. Changes in Soil Organic Carbon Stocks and Chemical Properties in Organogenic Soils Under Long-Term Agricultural Use in Central Europe, Poland / E. Zając et al. *Land Degradation & Development*. 2025. 36 (11). P. 3756–3768. <https://doi.org/10.1002/ldr.5597>.
10. Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances / R. van Klink et al. *Science*. 2020. Vol. 368, no. 6489. P. 417–420. <https://doi.org/10.1126/science.aax9931>.
11. Frank R., Braun H. E., Ripley B. D. Residues of insecticides, and fungicides in fruit produced in Ontario, Canada, 1986–1988. *Food Additives and Contaminants*. 1990. Vol. 7, no. 5. P. 637–648. <https://doi.org/10.1080/02652039009373929>.
12. Residues of Fungicides and Insecticides in Rice Field / G. M. Teló et al. *Agronomy Journal*. 2015. Vol. 107, no. 3. P. 851–863. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0475>.
13. Ліхо О. А., Гакало О. І. Формування зон забруднення підземних вод нітратами на території рівненської області. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*. 2024. Т. 2, № 94. С. 72–83. <https://doi.org/10.31713/vs220217>.
14. Dynamics study of the underground water biological pollution (Ukr) / L. L. Bereziuk et al. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*. 2025. No. 2. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-2-176-181>.
15. Jha, A. K., Sit, N. Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2022. Vol. 119. P. 579–591. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.019>.
16. Adrien. *Plant extracts for organic farming: Professional guide*. Home. <https://blog.landema.com/en/natural-solutions/pest-control/botanical-extracts-organic-farming/>.
17. Extraction by solvent using microwave and ultrasound-assisted techniques followed by HPLC analysis of Harpagoside from *Harpagophytum procumbens* and comparison with conventional solvent extraction methods / B. Baghdikian et al. *Comptes Rendus Chimie*. 2016. Vol. 19, no. 6. P. 692–698. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2016.02.020>.
18. Green extraction of secondary metabolites from plants: obstacles, current status, and trends / D. Torres-Ortiz et al. *Sustainable Chemistry for the Environment*. 2024. P. 100157. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100157>.
19. Bioactive compounds from plants and by-products: Novel extraction methods, applications, and limitations / A. A. Zaky et al. *AIMS Molecular Science*. 2024. Vol. 11, no. 2. P. 150–188. <https://doi.org/10.3934/molsci.2024010>.
20. Electromagnetic Fields and Electromagnetic Waves / S. Horikoshi et al. *Microwave Chemical and Materials Processing*. Singapore, 2024. P. 37–51. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-97-5795-4_3.
21. Simsek M., Sumnu G., Sahin S. Microwave Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Sour Cherry Pomace. *Separation Science and Technology*. 2012. Vol. 47, no. 8. P. 1248–1254. <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.644616>.
22. Brahim, M., Gambier, F., Brosse, N. Optimization of polyphenols extraction from grape residues in water medium. *Industrial Crops and Products*. 2014. Vol. 52. P. 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.030>.
23. Integral Extraction of *Opuntia ficus-indica* Peel Bioproducts via Microwave-Assisted Hydrodiffusion and Hydrodistillation / R. Ciriminna et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019. Vol. 7, no. 8. P. 7884–7891. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00502>.
24. Microwave assisted extraction of anthocyanins from grape skins / A. Liazid et al. *Food Chemistry*. 2011. Vol. 124, no. 3. P. 1238–1243. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.053>.
25. Extraction of antioxidants from mango seed kernel: Optimization assisted by microwave / C. Torres-León et al. *Food and Bioproducts Processing*. 2017. Vol. 105. P. 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.07.005>.
26. Solvent free microwave extraction of *Elletaria cardamomum* L.: A multivariate study of a new technique for the extraction of essential oil / M. E. Lucchesi et al. *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 79, no. 3. P. 1079–1086. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.029>.
27. Michel T., Destandau E., Elfakir C. Evaluation of a simple and promising method for extraction of antioxidants from sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) berries: Pressurised solvent-free microwave assisted extraction. *Food Chemistry*. 2011. Vol. 126, no. 3. P. 1380–1386. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.09.112>.

28. Green approach to the extraction of major capsaicinoids from habanero pepper using near-infrared, microwave, ultrasound and Soxhlet methods, a comparative study / J. Martínez et al. *Natural Product Research*. 2018. Vol. 33, no. 3. P. 447–452. <https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1455038>.
29. The Influence of Microwave-Assisted Extraction on the Phenolic Compound Profile and Biological Activities of Extracts from Selected *Scutellaria* Species / J. Orazc et al. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 9. P. 3877. <https://doi.org/10.3390/molecules28093877>.
30. The effect of ethanol/water concentration on phenolic composition, antioxidant, and antimicrobial activities of *Rosmarinus tournefortii* de Noé hydrodistillation solid residues / I. Ziani et al. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01722-6>.
31. The Influence of Microwave Treatments on Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of *Mentha piperita* L. / L. Bandici et al. *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 21. P. 7789. <https://doi.org/10.3390/ma15217789>.
32. Microwave-Assisted vs. Conventional Extraction of *Moringa oleifera* Seed Oil: Process Optimization and Efficiency Comparison / D. E. S. Souza et al. *Foods*. 2024. Vol. 13, no. 19. P. 3141. <https://doi.org/10.3390/foods13193141>.
33. Optimization of Microwave-Assisted Extraction Process for Production of Polyphenol-Rich Crude Extract from *Cinnamomum iners* Leaves / K. Tanruean et al. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 3. P. 1265. <https://doi.org/10.3390/app15031265>.
34. Gardner F. P. *Physiology of Crop Plants*. SENTIFIC, 2022. 327 p.
35. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Elsevier, 2012. URL: <https://doi.org/10.1016/c2009-0-63043-9>.
36. Biostimulants in Agriculture / ed. by Y. Rouphael, G. Colla. Frontiers Media SA, 2020. URL: <https://doi.org/10.3389/978-2-88963-558-0>.
37. Plant Immunity / ed. by J. M. McDowell. Totowa, NJ : Humana Press, 2011. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-61737-998-7>.
38. Murad A. A., Al-wagaa A. H., Hammad H. S. Effect of soil covering and spraying with plant extracts in vegetative growth properties of tomato. *Diyala Agricultural Sciences Journal*. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 34–44. <https://doi.org/10.52951/dasj.19110104>.

Fateeva K.O. APPLICATION OF MICROWAVE HEATING IN THE EXTRACTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS FROM PLANT MATERIALS

The problem of efficient extraction and utilization of biologically active compounds from plant materials using various extraction methods is considered. The main focus of the work is on extracts intended for use in agriculture to enhance plant resistance. The application of innovative extraction methods, one of which is microwave extraction as a non-toxic and sustainable technique, ensures a more environmentally friendly product that does not contain hazardous chemical substances. Based on the results of an analytical review, it has been established that the use of new and combined technologies increases extraction efficiency, reduces the amount of impurities in the final extract, and preserves thermosensitive compounds while lowering energy consumption. The determining extraction conditions that must be maintained regardless of the method are presented. The results of applying the microwave extraction method for the recovery of biologically active compounds from various raw materials are discussed. It is demonstrated that the microwave extraction method makes it possible to achieve a high concentration of biologically active substances under optimal solid-to-solvent ratio conditions. It has also been determined that solvent-free microwave extraction can be carried out using the residual water contained in plant materials, which minimizes additional reactions. Examples of the effective use of microwave fields for extracting various substances are provided, including the microwave power, solvent type, and processing time. The application of plant extracts to improve plant resistance and recovery is discussed. A methodology for laboratory studies of the efficiency of microwave extraction of biologically active compounds from a mixture of nettle, horsetail, and alfalfa for tomato seedlings is proposed. The microwave regime should be organized in such a way that the temperature does not exceed 60–65 °C, with pulsed modes being preferable.

Keywords: *extract, efficiency, temperature, microwave field power, technical conditions, research methodology.*

Дата першого надходження статті до видання: 18.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 620.193:667.6:547.56

DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/15>**Воробйова В.І.**<https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сікорський О.О.<https://orcid.org/0000-0002-3730-2016>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СТВОРЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІРЖІ НА ОСНОВІ ПРИРОДНИХ ПОЛІФЕНОЛЬНИХ СПОЛУК

Представлено експериментальне дослідження застосування таніну як активного перетворювального компонента водно-дисперсійних антикорозійних покриттів. Екстракцію таніну здійснювали з подрібненої кори мімози у водно-спиртових системах із ультразвуковою обробкою протягом 40 хв, що забезпечувало різну полярність екстрагенту та впливало на інгібуючі властивості отриманих розчинів. Результати показали, що зменшення полярності розчинника (збільшення вмісту етанолу) корелює зі зростанням коефіцієнта гальмування (17,97–23,49) та ступеня захисту металу (94,44–95,74 %), що свідчить про формування ефективного захисного шару та підвищення антикорозійної активності. IR-ATR спектри підтвердили утворення стабільних Fe-танінових комплексів і захисної плівки на поверхні металу, а XRD-аналіз показав трансформацію кристалічних оксидів заліза у більш стабільні аморфні сполуки. Механізм дії екстрактів мімозового таніну ґрунтується на хелатуванні іонів Fe^{2+}/Fe^{3+} , утворенні стабільних комплексів та полімеризації танінів на поверхні металу, що забезпечує формування бар'єрної плівки та ефективний антикорозійний захист. Оцінка адгезії покриттів методом хреста у камері сольового туману підтвердила високу стійкість покриттів, що містять екстракт таніну, у порівнянні з покриттями без попередньої обробки. Таким чином, мімозовий танін виступає перспективним природним компонентом для перетворювачів іржі та антикорозійних водно-дисперсійних покриттів, здатним підвищувати довговічність металевих конструкцій і забезпечувати стійкий захисний ефект. Екологічна сталість запропонованого підходу була оцінена за допомогою інструменту ComplexMoGAPI, що демонструє потенціал використання цього природного компонента в «зелених» технологіях захисту металу.

Ключові слова: водно-дисперсійне покриття, антикорозійний захист, зелена хімія, корозія, поліфенольні сполуки.

Постановка проблеми. Одним із найбільш затребуваних у промисловості, водночас науково недостатньо опрацьованих і актуальних напрямів є створення екологічно безпечних («зелених») інгібіторів корозії та інгібованих матеріалів на їх основі, призначених для захисту технологічного обладнання й виробів металообробної галузі від корозійного руйнування. В умовах повномасштабної війни, у яку Україна була втягнута з 2022 року,

проблема протикорозійного захисту озброєння та військової техніки під час експлуатації, зберігання і транспортування набуває особливого значення як складова забезпечення національної безпеки та обороноздатності держави. Згідно з даними маркетингових досліджень *Global Market Insight*, стабільне зростання попиту на інгібітори корозії та матеріали і покриття на їх основі для хімічної, електротехнічної промисловості, оборонного комп-



лексу та суміжних галузей є одним із ключових чинників розвитку світового й вітчизняного ринку інгібованих полімерних матеріалів. Очікується, що до кінця 2027 року його глобальна ринкова капіталізація сягне приблизно 13,5 млрд доларів США. Актуальність зумовлена зростаючою потребою у створенні ефективних та екологічно безпечних протикорозійних матеріалів на основі відновлюваної рослинної сировини, здатних замінити традиційні токсичні інгібітори корозії [1-2]. Мімозовий танін є перспективною сировиною для антикорозійного захисту завдяки високій реакційній здатності, добрій розчинності у водних середовищах та хімічній стійкості конденсованих танінів. Водночас антикорозійна ефективність танінів істотно залежить від їх компонентного складу, який визначається типом екстрагенту, проте питання цілеспрямованого вибору розчинника для одержання оптимального екстракту мімозового таніну залишається недостатньо вивченим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування інгібіторів корозії як засобів протикорозійного захисту характеризується відносною дешевизною, високою ефективністю та технологічною простотою. Водночас, попри очевидні переваги, цей підхід супроводжується низкою проблем, зумовлених здатністю інгібіторів, які часто проявляють властивості поверхнево-активних речовин або окисників, взаємодіяти з плівкоутворювачами, що може призводити до зниження їх інгібуючої активності. Крім того, введення інгібіторів до складу багатокомпонентних систем, зокрема лакофарбових матеріалів, може спричинити хімічну взаємодію з плівкоутворювальними компонентами або пігментами з утворенням нових сполук, які здатні проявляти як захисні, так і потенційно агресивні властивості [3-4].

У цьому контексті першочерговим науково-практичним завданням є принципова заміна традиційних токсичних інгібіторів на екологічно безпечні альтернативи, отримані з вторинної рослинної сировини. У межах цього напряму автором вже виконано комплекс досліджень, за результатами яких встановлено, що екстракція рослинної сировини розчинниками помірної полярності забезпечує одержання суміші різноманітних органічних сполук, що включає як водорозчинні, так і жиророзчинні компоненти. Такий багатокомпонентний склад обумовлює універсальність їх захисної дії та відкриває можливості для створення нових інгібованих матеріалів [6-7].

Водночас другим важливим напрямом є цілеспрямоване використання «зелених» інгібіторів

для підвищення корозійної стійкості захисних лакофарбових і полімерних матеріалів. Це передбачає детальний аналіз хімічного складу екстрактивних речовин агропромислових рослинних відходів України, встановлення механізмів їх інгібуючої дії, особливостей адсорбційної поведінки та фізико-хімічних процесів взаємодії природних органічних сполук у складі покриттів з металевою поверхнею [8]. Слід зазначити, що модифікування лакофарбових покриттів інгібіторами корозії принципово відрізняється від підвищення їх захисних властивостей шляхом введення антикорозійних пігментів. Використання «зелених» інгібіторів дає змогу варіювати їх концентрацію в широких межах, а також забезпечує можливість взаємодії з плівкоутворювачами, що дозволяє цілеспрямовано регулювати фізико-механічні характеристики плівок і покриттів, зокрема твердість, пластичність та кінетику затвердіння.

Постановка завдання. Визначення впливу природи розчинника на склад екстракту мімозового таніну та оцінка його ефективності як активного компонента перетворювача іржі для воднодисперсійних захисних покриттів.

Виклад основного матеріалу

Методика експериментальних досліджень.

Як активний перетворювальний компонент воднодисперсійних покриттів було обрано мімозовий танін - природні поліфенольні сполуки, що отримуються з кори однойменного дерева. Прискорені та натурні корозійні випробування проводили на зразках листової сталі марки Ст.3 прямокутної форми розміром 50×20×1,5 мм; кожен зразок мав технологічний отвір діаметром 5–6 мм. Екстракцію таніну здійснювали з подрібненої кори мімози з використанням водно-спиртових систем із застосуванням ультразвукової обробки, 40 хвилин.

Оцінку інгібуючої дії здійснювали за вимірюванням втрати маси відповідно до стандарту ASTM G31-72 з використанням зразків із сталі розмірами 5,0 × 3,0 × 0,2 см. Перед кожним експериментом зразки послідовно шліфували та полірували абразивними шкірками (220–1200), ретельно промивали дистильованою водою, знежирювали ацетоном та висушували. Початкову масу кожного зразка фіксували аналітичною вагою, після чого зразки занурювали у 3 % розчин NaCl, як без додавання інгібітора, так і з різними концентраціями екстракту таніну Мімози. Після заданого часу занурення зразки витягували, обережно промивали, висушували та повторно зважували. Втрату маси визначали як різницю між початковою та кінцевою масою. Усі експерименти

проводили в трьох повтореннях, а середнє значення втрати маси використовували для подальших розрахунків.

Розчин, що був використаний як перетворювач іржі містив екстракту таніну Мімози складався з наступних компонентів (мас. %): екстракт таніну Мімози – 68,10 %, щавлева кислота ($C_2H_2O_4$) – 28,34 %, нітрат срібла ($AgNO_3$) – 0,56 %, етидрина кислота-1 ($C_2H_8O_7P_2$) – 3,00 %. Листи холоднокатаного металу ($5 \times 10 \times 0,05$ см) спочатку знежирювали, промивали дистильованою водою і залишали на відкритому повітрі протягом трьох місяців для природного утворення іржі. Після цього поверхню очищали від будь-яких відшарованих частинок іржі. Перетворювач іржі наносили рівномірно за допомогою ручного валика, після чого зразки залишали для висихання при кімнатній температурі протягом 24 годин. Після висихання поверхню покривали водно-дисперсійним покриттям і залишали сушитися ще 24 години в тих же умовах. Компоненти змішували при кімнатній температурі до отримання однорідного розчину, який використовували як робочий перетворювач іржі для обробки металевих зразків.

Оцінка корозійної стійкості та адгезії покриттів. Для оцінки корозійної стійкості антикорозійного покриття використовували нейтральний сольовий туман відповідно до стандарту ASTM B117. Адгезію покриттів до поверхні визначали методом хреста в камері сольового туману (cross-cut method), який є стандартним для прискорених випробувань. Параметри камери сольового туману: Температура: 35 ± 2 °C, Концентрація NaCl у розчині: 5 % мас., pH розчину перед запуском: 6,5–7,2, Осадження туману: 1,0–2,0 мл/80 см²/год.

Металеві зразки спочатку обробляли екстрактом таніну Мімози (нанесення пензлем). Концентрації таніну у розчині для обробки становили 136,2; 120,0; 79,5 та 99,9 г/л, оптимальні значення визначали експериментально. Після нанесення екстракту поверхню залишали для висихання при кімнатній температурі. Потім наносили водно-дисперсійне покриття товщиною 50–100 мкм та сушили 4 години.

Для оцінки адгезії на поверхні наносили хрест (ISO 2409 або ASTM D3359) з розміром квадрата 11×11 і глибиною до основного металу. Шкала оцінки адгезії (ISO 2409): 0 – ідеальна адгезія, відшарування відсутнє; 1 – незначні дефекти (≤ 5 % площі); 2–4 – поступове збільшення площі відшарування.

Отримані експериментальні результати

Оцінка інгібуючих властивостей та перетворюючої здатності екстрактів таніну Мімози. Досліджували розчини екстракту, отримані з використанням водно-спиртових систем із різним співвідношенням (табл. 1), що зумовлює різну полярність екстрагенту. Аналізуючи разом із даними антикорозійної активності, можна спостерігати, що зниження полярності розчинника корелює зі збільшенням коефіцієнта гальмування (від 17,9 до 23,4) та ступеня захисту (від 94,44 % до 95,74 %). Це свідчить про те, що більш неполярні розчинники (з вищим вмістом етанолу) сприяють формуванню більш ефективного захисного шару на поверхні металу та підвищують антикорозійну активність розчинів.

Для оцінки здатності екстрактів до перетворення іржі використовували IR-ATR спектроскопію. Метод дозволяє виявляти як органічні залишки (наприклад, Fe-таніни), так і неорганічні фази (оксиди та гідроксиди заліза) (табл. 3, рис. 1). Спектри показують відмінності у інтенсивності піків у ключових діапазонах, що відображає різний склад і структуру захисних плівок на поверхні металу після обробки екстрактами.

Широкий піковий діапазон 3200–3600 см⁻¹ відповідає ОН-групам, інтенсивність якого залежить від залишкової вологості та гідроксильних груп на поверхні. Піки 1600–1700 см⁻¹ відображають C=O і C=C зв'язки та утворення метал-органічних комплексів (Fe-таніни). Найбільшу інтенсивність у цьому діапазоні показав екстракт із розчинником 20Вода/80ЕтОН, що свідчить про ефективне зв'язування компонентів екстракту з продуктами корозії. Піки 1400–1600 см⁻¹ відповідають ароматичним групам флавоноїдів, а діапазон 1000–1300 см⁻¹ свідчить про утворення C-O-C ефірних зв'язків під час полімеризації тані-

Таблиця 1

Досліджувані екстракти таніну Мімози, що отримані різними системами розчинників, інгібуюча ефективність екстракту

Розчинник	Розчин 1	Розчин 2	Розчин 3	Розчин 4
Вода	80	70	30	20
Етанол (ЕтОН)	20	30	70	80
Полярність розчинника	9,2	8,7	6,7	6,2
Коефіцієнт гальмування	17,970	19,122	22,096	23,488
Ступінь захисту, %	94,44	94,77	95,47	95,74

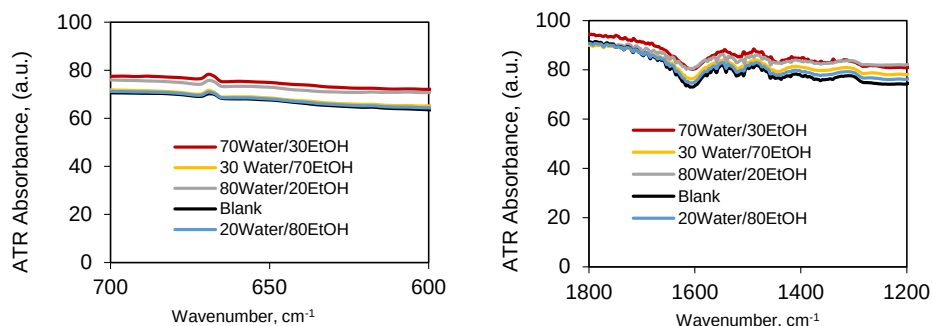


Рис. 1. ATR-спектри (атенюованої повної рефлексії) продуктів іржі оброблених що попередньо була оброблена досліджуваними

нів на металі. Екстракти з високим вмістом етанолу (80 %) забезпечують глибше проникнення у пористу структуру іржі та сприяють формуванню стабільних Fe-танінових комплексів. Натомість системи з високим вмістом води (80Вода/20EtOH) показують найменшу ефективність перетворення продуктів корозії. Це пояснюється залежністю розчинності активних компонентів екстракту від співвідношення вода/етанол: таніни добре розчиняються у воді, а деякі поліфеноли – у водно-етанольних сумішах з переважанням етанолу.

Таблиця 2

Характеристика фаз заліза та довжини їх піків

Фаза іржі	Довжина хвилі
γ -FeOOH	1020
α -FeOOH	880, 795
Fe ₃ O ₄	580
δ -FeOOH	1110, 465
α -Fe ₂ O ₃	535

Таким чином, можна зробити висновок, що екстракти таніну Мімози, будучи природними поліфенольними сполуками, здатні взаємодіяти з металами та утворювати стабільні комплекси. Механізм їхньої перетворюючої дії при обробці іржі полягає в наступному. По-перше хелатування іонів заліза. Танінові молекули містять численні гідроксильні (-OH) та фенольні групи, які здатні зв'язуватися з іонами Fe²⁺ та Fe³⁺. Взаємодія з оксидами заліза призводить до утворення стабільних танатів заліза, що зменшує доступність іонів для подальшої корозії та стабілізує поверхню металу [9-10]. Утворені Fe-танінові комплекси створюють тонку стійку плівку на поверхні металу, яка перешкоджає проникненню вологи та кисню, знижуючи швидкість окиснення заліза та забезпечуючи антикорозійний ефект. Взаємодія з металом може спричиняти полімеризацію танінів, що призводить до формування додаткових полімерних структур,

які посилюють бар'єрні властивості плівки. Підсумовуючи дані ІЧ-спектроскопії, дія екстрактів таніну Мімози на іржу ґрунтується на хелатуванні іонів заліза, утворенні стабільних комплексів та формуванні захисної плівки, що ефективно запобігає подальшій корозії та продовжує термін служби металевих конструкцій. Екстракти таніну Мімози, що виступають як перетворювач іржі, взаємодіють із кристалічними оксидами заліза, що призводить до утворення аморфного шару. Зменшення інтенсивності XRD-піків кристалічних фаз іржі (гетит, лепідокроцит, магнетит) та поява додаткових смуг танатів заліза в ІЧ-спектрах після обробки підтверджують хімічну реакцію між перетворювачем іржі та оксидами. Після обробки шар іржі трансформується у компактні та гладкі сполуки, при цьому вміст α -FeOOH та γ -FeOOH значно зменшується, що підкреслює ефективність перетворення. Механізм дії екстрактів ґрунтується на їх здатності реагувати з оксидами заліза та перетворювати їх у стабільніші форми, а також на полімеризації танінових сполук на поверхні металу. Гідроксильні (-OH) та фенольні групи танінів зв'язуються з іонами Fe²⁺ та Fe³⁺, утворюючи стабільні комплекси, які формують тонку плівку на поверхні металу. Ця плівка перешкоджає проникненню вологи та кисню, запобігаючи подальшому окисненню заліза, і діє як антикорозійний бар'єр. Полімеризація сполук посилює бар'єрні властивості утвореної плівки, підвищуючи її захисний ефект.

Для оцінки адгезії покриттів до поверхні застосовували метод хреста в камері сольового туману (cross-cut method), що є стандартним способом при прискорених випробуваннях [11]. Метод дозволяє визначити, наскільки ефективно покриття разом із попередньою обробкою перетворювачем захищає метал від корозії у сольовому середовищі. Досліджували наступні зразки: Зразок «0» – пластина, пофарбована двома шарами без обробки пере-

творювачем. Зразок «Н» – пластина, оброблена комерційним перетворювачем та пофарбована двома шарами білої радіаторної емалі Тріора.

Зразок № 3 – пластина, оброблена водно-дисперсійними покриттями за рецептурою що містить екстракт мімози та пофарбовані двома шарами тієї ж емалі. Зразки витримували в камері сольового туману при температурі 35 °С з розчином NaCl 5 % (рН 6,5–7,2), осадження туману

становило 1,0–2,0 мл/80 см²/год. Після випробування зразки промивали дистильованою водою, висушували та оглядали поверхню на наявність корозії, підриву покриття та відшарування в зоні хреста. Оцінка адгезії проводилась за шкалою ISO 2409: 0: жодних пошкоджень; 1: незначне відшарування (<5 % площі); 5: сильне відшарування (>65 % площі). Після 72 годин експозиції корозійні процеси стають більш вираженими.

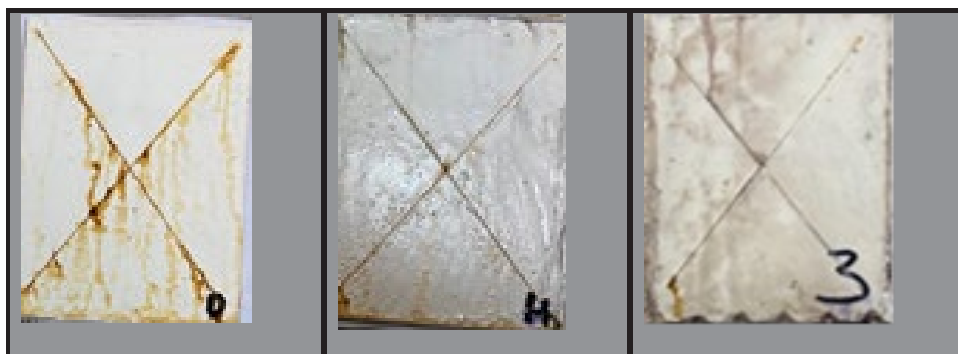


Рис. 2. Вигляд зразків після 72 годин у камері сольового туману

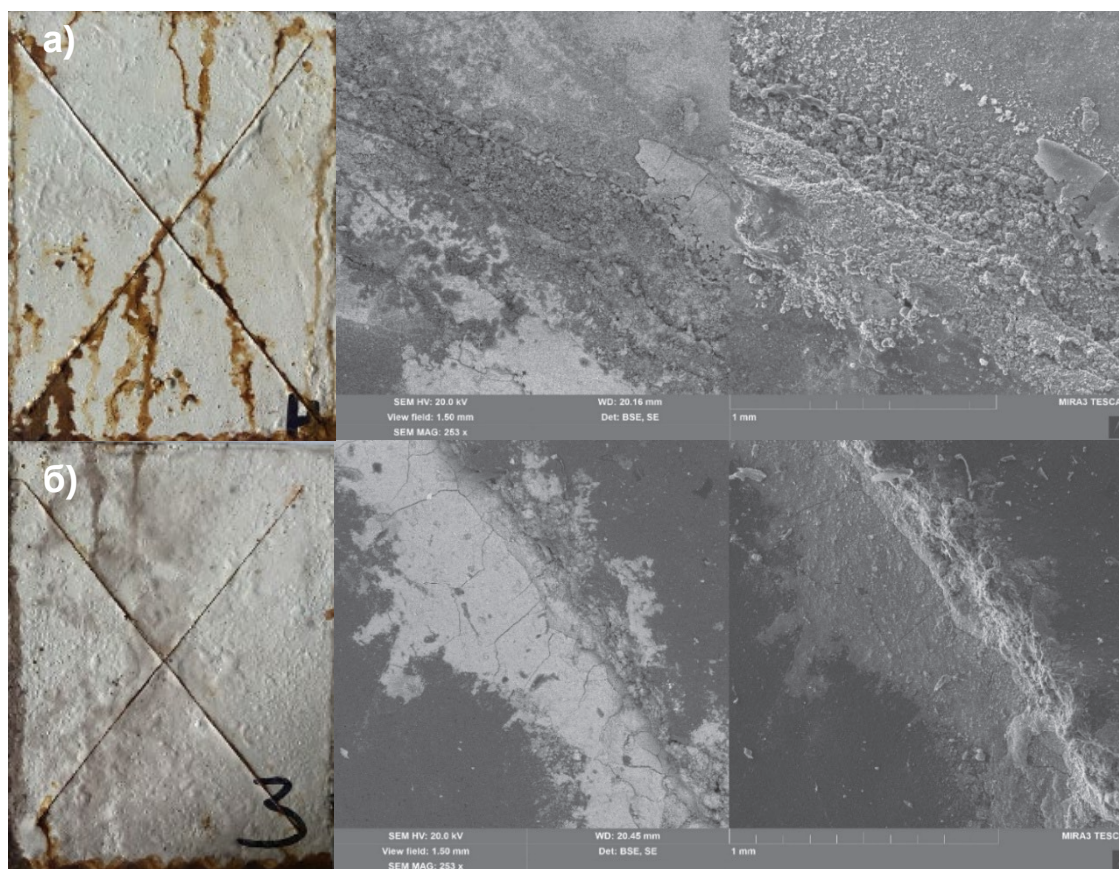


Рис. 3. СЕМ місця надрізу зразків після 140 годин у камері сольового туману: а - Зразок «Н» – пластина, оброблена комерційним перетворювачем та пофарбована двома шарами білої радіаторної емалі Тріора; б - 3 – пластина, оброблена водно-дисперсійними покриттями за рецептурою що містить екстракт мімози та пофарбовані двома шарами тієї ж емалі

У зразках із низькою адгезією («0» та «Н») спостерігаються інтенсивні сліди рудого нальоту, що свідчить про більш глибоке ураження металу. Зразок 3 із високою адгезією зберігає захисні властивості покриття, продовжуючи захищати поверхню від корозії.

Оцінка екологічної стійкості та «зеленості» розробленого методу отримання екстракту поліфенольних сполук таніну мімози та його використання у складі перетворювача іржі була проведена за допомогою спеціалізованого інструменту AGREEprep та ComplexMoGAPI (рис. 4 а). Нижче наведено детальний опис результатів цієї оцінки: Оцінка проводилася відповідно до 12 принципів аналітичної «зеленості». Кожен критерій оцінювався за шкалою від 0 до 1, де вищі значення вказують на мінімальний негативний вплив на довкілля. При розрахунках враховувалися вагові коефіцієнти для кожного принципу, що дозволило отримати об'єктивний підсумковий індекс. Ключові показники «зеленості»:

1) Мінімальна токсичність. Основна увага приділялася використанню безпечних реагентів та розчинників. Вибір етанолу та води як основних компонентів для екстракції дозволив значно знизити екологічне навантаження порівняно з традиційними методами, що використовують агресивніші хімікати.

2) Енергоефективність. Процес був розроблений з метою оптимізації енергетичних витрат на кожному етапі підготовки.

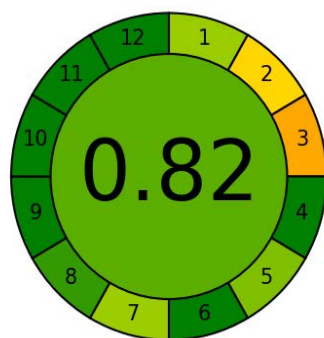
3) Безпека процесу. Головною метою було отримання ефективного антикорозійного засобу з мінімальним ризиком для дослідника та навколишнього середовища.

4) Підсумковий результат. За допомогою програмного забезпечення AGREEprep було згенеровано загальний індекс «зеленості» (відображений

у формі кругової діаграми), який підтверджує високу екологічну безпечність та сталість запропонованої технології.

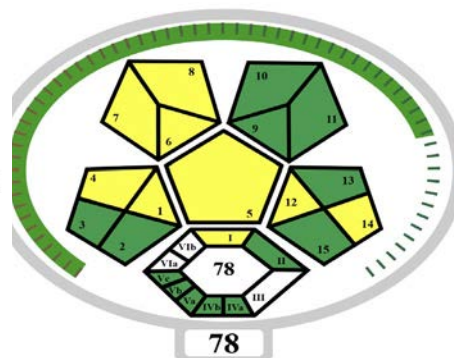
Використання AGREEprep дозволило авторам науково обґрунтувати, що розроблений перетворювач іржі на основі поліфенольних сполук танінів мімози є не лише ефективною, але й екологічно відповідальною альтернативою комерційним аналогам.

Оцінка процесу екстракції мімозового таніну, призначеного для створення екологічного перетворювача іржі, була виконана із застосуванням програми ComplexMoGAPI, що дозволяє комплексно проаналізувати стадію підготовки зразка з позицій «зеленої» хімії, безпеки та відповідності принципам сталої економіки. За результатами аналізу встановлено, що стадія AMPLE Preparation характеризується мінімальним впливом на довкілля та оператора. Відбір і підготовка сировини здійснюються без етапів консервації, транспортування та спеціального зберігання, а сам процес реалізується у режимі on-line / at-line за нормальних умов. Методика екстракції базується на простих фізичних операціях (фільтрація, декантація) у масштабі мікроекстракції, що забезпечує зменшення кількості реагентів та відходів. У програмі ComplexMoGAPI процес класифіковано як такий, що використовує зелені розчинники та реагенти в об'ємі менше 10 мл з низькими показниками токсичності та пожежонебезпеки (NFPA 0–1). Інструментальне забезпечення не потребує спеціалізованих або енергоємних установок, а енергоспоживання не перевищує 1,5 кВт·год на зразок, що відповідає вимогам енергоефективності. Процес екстракції є герметизованим, що знижує професійні ризики, а кількість утворених відходів становить лише 1–10 мл із можливістю їх подальшого рециклінгу.



1. Sample treatment
2. Sample amount
3. Device positioning
4. Sample prep. stages
5. Automation, miniaturization
6. Derivatization
7. Waste
8. Analysis throughput
9. Energy consumption
10. Source of reagents
11. Toxicity
12. Operator's safety

а



б

Рис. 4. Оцінка «зеленості» методу отримання екстракту таніну мімози для перетворювача іржі (AGREEprep (а), ComplexMoGAPI) (б)

Додаткові стадії очищення або кількісного визначення екстракту не застосовуються, оскільки отриманий танін використовується безпосередньо як функціональний активний компонент перетворювача іржі. Важливою перевагою, відображеною в оцінці ComplexMoGAPI, є поєднання м'яких умов процесу (кімнатна температура, тривалість менше 1 години) з високим виходом екстракту (70–89 %). Це підтверджує ефективність вилучення поліфенольних сполук без застосування агресивних реагентів або енергоінтенсивних стадій. Таким чином, результати моделювання в програмі ComplexMoGAPI свідчать, що розроблений підхід до екстракції мімозового таніну повністю відповідає концепції «green-by-design» і є придатним для масштабування в технологіях створення екологічно безпечних перетворювачів іржі.

Висновки. Тип розчинника суттєво впливає на компонентний склад та інгібуючі властивості. Оптимальним співвідношенням Вода/Етанол є 20/80, оскільки ця система забезпечує найкращий баланс для розчинення як полярних, так і менш полярних компонентів танінового комплексу, що гарантує максимальну антиоксидантну здатність. Гравіметричні дослідження

в нейтральному середовищі (3,0% NaCl) підтвердили високу ефективність поліфенольних сполук таніну як інгібітора корозії. Процес трансформації іржі під дією сполук є двостадійним. Перша стадія включає хелатування — реакцію активних сполук таніну з оксидами заліза (Fe_2O_3 та Fe_3O_4) з утворенням стабільних залізо-танінових комплексів. Друга стадія полягає у полімеризації танінів на поверхні сталі, що створює щільну органічно-неорганічну бар'єрну плівку, яка запобігає подальшому проникненню кисню та вологи. Розроблено рецептуру перетворювача іржі, яка продемонструвала значний потенціал для захисту сталі. Результати випробувань у камері соляного туману показали, що попереднє оброблення поверхні перетворювачем на основі поліфенольних сполук таніну суттєво покращує адгезію наступних лакофарбових покриттів та обмежує поширення корозії порівняно з комерційними аналогами. Оцінка за допомогою інструменту AGREErper та ComplexMoGAPI підтвердила екологічну безпечність процесу отримання екстракту та його використання у складі перетворювачів іржі, що робить цей підхід перспективним для створення сталих антикорозійних технологій.

Список літератури:

1. Ross T. K., Francis R. A. The treatment of rusted steel with mimosa tannin. *Corrosion Science*. 1978. № 18. С. 351–361.
2. Flores Merino S., Caprari J. J., Vasquez Torres L., Figueroa Ramos L., Hadzich Girola A. Inhibitive action of tara tannin in rust converter formulation. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2017. № 64. С. 136–147.
3. Nardeli J. V., Fugivara C. S., Taryba M., Pinto E. R. P., Montemor M. F., Benedetti A. V. Tannin: A natural corrosion inhibitor for aluminum alloys. *Progress in Organic Coatings*. 2019. № 135. С. 368–381.
4. Qian B., Hou B., Zheng M. The inhibition effect of tannic acid on mild steel corrosion in seawater wet/dry cyclic conditions. *Corrosion Science*. 2013. № 72. С. 1–9.
5. Saji V. S. Progress in rust converters. *Progress in Organic Coatings*. 2019. № 127. С. 88–99.
6. Li J., Ge S., Wang J., Du H., Song K., Fei Z., Shao Q., Guo Z. Water-based rust converter and its polymer composites for surface anticorrosion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018. № 537. С. 334–342.
7. Martinez S. Inhibitory mechanism of mimosa tannin using molecular modeling and substitutional adsorption isotherms. *Materials Chemistry and Physics*. 2003. № 77. С. 97–102.
8. Rahim A. A., Rocca E., Steinmetz J., Kassim M. J., Adnan R., Ibrahim M. S. Mangrove tannins and their flavanoid monomers as alternative steel corrosion inhibitors in acidic medium. *Corrosion Science*. 2007. № 49. С. 402–417.
9. Vorobyova V., Sikorsky O., Skiba M., Vasyliov G. Quebracho tannin as corrosion inhibitor in neutral media and novel rust conversion agent for enhanced corrosion protection. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2023. № 44. С. 68–80.
10. Hao Y., Hu M., Li C., Shen Y., Liu S., Chang H., Li P., Yun Q., Song L. Anticorrosion mechanism of waterborne epoxy coating containing polyaniline-adsorbed aluminum ions for carbon steel. *Progress in Organic Coatings*. 2026. № 213. Article 109988. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2026.109988.
11. Mansour F.R., Omer K.M., Plotka-Wasyłka J., A total scoring system and software for complex modified GAPI (ComplexMoGAPI) application in the assessment of method greenness, *Green Anal. Chem.* 10 (2024) 100126.doi:10.1016/j.greeac.2024.100126.

Vorobiova V.I., Sikorsky O.O. CREATION OF AN ECOLOGICAL RUST CONVERTER BASED ON NATURAL POLYPHENOL COMPOUNDS

An experimental study of the use of tannin as an active transforming component of water-dispersion anticorrosive coatings is presented. Tannin extraction was carried out from crushed mimosa bark in water-alcohol systems with ultrasonic treatment for 40 min, which provided different polarity of the extractant and affected the inhibitory properties of the obtained solutions. The results showed that a decrease in solvent polarity (an increase in ethanol content) correlates with an increase in the inhibition coefficient (17.97–23.49) and the degree of metal protection (94.44–95.74%), which indicates the formation of an effective protective layer and increased anticorrosive activity. IR-ATR spectra confirmed the formation of stable Fe-tannin complexes and a protective film on the metal surface, and XRD analysis showed the transformation of crystalline iron oxides into more stable amorphous compounds. The mechanism of action of mimosa tannin extracts is based on chelation of $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ions, formation of stable complexes and polymerization of tannins on the metal surface, which ensures the formation of a barrier film and effective anti-corrosion protection. Assessment of adhesion of coatings by the cross method in a salt spray chamber confirmed the high resistance of coatings containing tannin extract compared to coatings without pre-treatment. Thus, mimosa tannin is a promising natural component for rust converters and anti-corrosion water-dispersion coatings, capable of increasing the durability of metal structures and providing a stable protective effect. The environmental sustainability of the proposed approach was assessed using the AGREEprep and ComplexMoGAPI tool, demonstrating the potential of using this natural component in “green” metal protection technologies.

Keywords: water-dispersion coating, anti-corrosion protection, green chemistry, corrosion, polyphenolic compounds.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Глуховський В.В.<https://orcid.org/0000-0003-3917-174X>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МІЖФАЗНА ВЗАЄМОДІЯ У ЗОНІ КОНТАКТУ ТА ЇЇ РОЛЬ У ЗМІЦНЕННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті представлені результати дослідження залежності фізико-механічних характеристик моделей склофібробетонних композицій від інтенсивності процесів хімічної взаємодії у зоні контакту армуючий компонент – матриця.

Огороджуючи матеріали на основі неорганічних в'язучих та скляних волокон – це високоефективні композитні матеріали, які характеризуються високою міцністю на розтяг, корозійною стійкістю та довговічністю у порівнянні із звичайним бетоном. Вироби на основі цього матеріалу характеризуються низкою вагою та естетичною гнучкістю, що робить його особливо придатним для облицювання фасадів, збірних компонентів та промислового застосування.

У ряді досліджень було показано, що включення до складу склофібробетонних композитів пуцоланових добавок, таких як кремнеземний пил, метакаолін та зола-виношення, покращує їх механічні властивості та довговічність, зменшуючи проблеми, які пов'язані зі старінням. Нанорозмірні добавки, зокрема одностінні вуглецеві нанотрубки, сприяють подальшому покращенню оброблюваності, корозійної стійкості та міжфазного зв'язку в зоні контакту армуючий компонент-матриці. Показано також, що характеристики склофібробетонів залежать від типу, вмісту та розмірів використаних скловолокна, зокрема, стійкі до лугів скловолокна ефективні для запобігання утворенню мікротріщин на ранніх стадіях, тим самим покращуючи міцність на розтяг та згин. Експериментальні дослідження підтверджують, що зміни характеристик волокон безпосередньо впливають на механічні характеристики [1].

Предметом дослідження є вивчення залежності експлуатаційних властивостей композицій на основі неорганічних в'язучих та мінеральних волокон від процесів хімічної взаємодії у зоні контакту між новоутвореннями твердіючого неорганічного в'язучого та армуючим компонентом з використанням модельних систем.

У якості об'єктів дослідження використані склоцементні композиції на основі армуючих компонентів зі стекол різної гідролітичної стійкості та матриць на основі неорганічних в'язучих, які суттєво відрізняються складом продуктів гідратації та ступенем агресивності середовища по відношенню до матеріалу армуючих компонентів.

Ключові слова: дисперсно-армовані композиційні матеріали, скляні волокна, скляні штапики, міцність на розтяг при згині, портландцемент, глиноземистий цемент, будівельний гіпс, гіпсове в'язуче α -модифікації.

Постановка проблеми. Найбільш широко використовуваним композиційним матеріалом на основі портландцементу є бетон. Беручи до уваги експлуатаційні характеристики будівель та споруд на основі портландцементного бетону, протягом усього їх життєвого циклу, бетон забезпечує значні переваги у плані стійкості порівняно з іншими будівельними матеріалами завдяки своїм внутрішнім властивостям, таким як міцність, довговічність, стійкість до екстремальних погодних умов та техногенних подій. Крім того, цього кон-

струкційного матеріалу достатньо, він доступний за ціною, доступний на місцевому рівні і може використовуватися незліченними способами [2].

У той же час, одним із недоліків конструкцій на основі бетону, є їхня висока матеріалоемність, яка компенсує крихкість цього композиту та його низьку міцність при розтягу, що досягається використанням металевої арматури.

У разі, коли необхідно створити тонкостінну конструкцію, спосіб армування виробів металевою арматурою не підходить, що зумовлює

необхідність використання у якості армуючого компонента тонких дисперсних волокон різного хімічного складу. Але якщо армуючий компонент вводиться з метою підвищення міцності композицій при розтягу, дисперсні волокна які використовуються, повинні мати модуль пружності вище, ніж модуль пружності матеріалу матриці. До таких волокон відноситься: хризотил-азбест, скляне волокно, вуглецеві та корундові волокна та відрізки металевих дроту.

Композиційні матеріали на основі неорганічного в'язучого та скляного волокна є багатокомпонентною системою, стан якої залежить від великої кількості внутрішніх та зовнішніх факторів. До внутрішніх чинників, що впливають стан системи, можна віднести склад в'язучого, кількість скловолокна, водоцементне відношення, кількість добавок і заповнювача. Кількісна зміна одного або кількох з цих параметрів спричиняє різку зміну структури композиції, її пористості, лужності середовища, впливає на величину деформації. До зовнішніх факторів можна віднести температуру тепловологої обробки, температуру і вологість середовища зберігання та експлуатації, діючі навантаження.

Властивості композитних матеріалів на основі неорганічних в'язучих та скляних волокон залежать не тільки від фізико-хімічних властивостей компонентів, але і від міцності зв'язку між ними. Максимальна міцність досягається, якщо між матрицею і армуючими елементами відбувається утворення твердих розчинів або хімічних сполук. Будь-який зразок класу композитних матеріалів представляє собою комбінацію в певних пропорціях основних (матриці, неорганічного заповнювача) і додаткових компонентів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Властивості дисперсно-армованих композитів на основі неорганічних в'язучих та тонких мінеральних волокон (діаметром 10...15 мкм) залежать від складу компонентів, марки цементу, водоцементного відношення, щільності цементної матриці, виду та складу волокна, їхньої орієнтації і рівномірності розподілу в об'ємі, технологій виробництва та умов експлуатації виробів [4-5].

На корозію скляних волокон безпосередній вплив робить вибір в'язучого. Збільшення лужності середовища матеріалу матриці підвищує швидкість корозії волокна. Цим пояснюється вища стійкість волокон у глиноземистому цементі у порівнянні з портландцементом. Тому автори багатьох робіт пропонують використовувати для скловолокнистих композицій глиноземистий та

інші мало вапняні цементы, а також цемент із добавками метакаоліну (до 25%) та мікрокремнезему (до 25%) [3].

Так само відомо, що зміни властивостей композитів на основі цементу армованого скловолокном у часі є результатом дії лужного середовища матриці та процесу ущільнення матриці у зоні її контакту зі скловолокном, що дозволяє стверджувати, що мікроструктура новоутворень в зоні контакту суттєво впливає на довговічність композиції [6, 7].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження основних закономірностей формування зони контакту композицій на основі неорганічних в'язучих та мінеральних волокон з використанням модельних систем.

Виклад основного матеріалу. В якості об'єктів дослідження використані склоцементні композиції у яких у якості матеріалу матриці використовувалися портландцемент, гіпсоглиноземистий цемент, гіпсові в'язучі марки Г4 та α – напівгідрат марки Г22. Вибір перерахованих в'язучих як матеріалу матриці обумовлений тим, що цементний камінь, одержуваний на основі кожного з них, відрізняється природою лужних оксидів, що створюють лужне середовище, величиною рН цього середовища і складом новоутворень. Гіпсоглиноземистий цемент представлений переважно низькоосновними алюмінатами кальцію, при гідратації яких утворюється слаболужне середовище з рН 10 – 11. Портландцемент представлений в основному високоосновними силікатами, алюмінатами і алюмоферитами кальцію, при гідратації яких утворюється лужне середовище з рН 12,5 – 13, значення якого залишається постійною протягом значного періоду. Середовище твердіючого гіпсового в'язучого, незалежно від марки, характеризується нейтральним значенням рН.

В якості модельних систем для вивчення процесу формування зони контакту матеріалу матриці та армуючого компонента у композиціях на основі неорганічних в'язучих були обрані системи, що являють собою зразки-балочки, виготовлені з тіста нормальної густоти неорганічного в'язучого з арматурою у вигляді скляних штапиків (стрижнів). Вибір даного виду армуючого компонента для модельних систем був обумовлений наступними положеннями:

– використання у якості армуючого компонента «масивного скла», яке на відміну від скляних волокон, практично не змінює своєї міцності у середовищі в'язучого, що твердіє, дозволило встановити основні закономірності формування міцності композицій з часом без урахування про-

цесів, пов'язаних з корозією тонких скляних волокон;

– використання штапиків із скла різного хімічного складу та з різним значенням гідролітичної стійкості дозволить оцінити залежність характеристик міцності досліджуваних композицій від інтенсивності процесів взаємодії агресивних новоутворень неорганічного в'язучого з поверхнею армуючого компонента;

– добре виражена межа контакту армуючого компонента у модельних системах дозволила провести дослідження з вивчення складу та основних фізико-механічних характеристик новоутворень зони контакту армуючий компонент – матриця;

– суттєва відмінність значень температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) для скла С90-1 ($0,97 \cdot 10^{-5} \text{град.}^{-1}$) та С52-1 ($0,52 \cdot 10^{-5} \text{град.}^{-1}$) дозволило визначити вплив цього параметру на формування міцності композиції при теплової обробці з урахуванням того, що ТКЛР матеріалу матриці становив $1,02\text{--}0,98 \cdot 10^{-5} \text{град.}^{-1}$, тобто близький до аналогічного показника скла С90-1 і майже у два рази відрізнявся від ТКЛР скла С52-1.

Результати визначення гідролітичного класу скляних штапиків, які використовувалися при дослідженні основних закономірностей формування структури композицій та їхнє позначення у тексті представлені у таблиці 1.

Кінетика зміни межі міцності при згині ($R_{\text{зг}}$) модельних композицій на основі портландцементу та армуючого компонента Ст1, що тверділи у воді, представлена на рисунку 1.

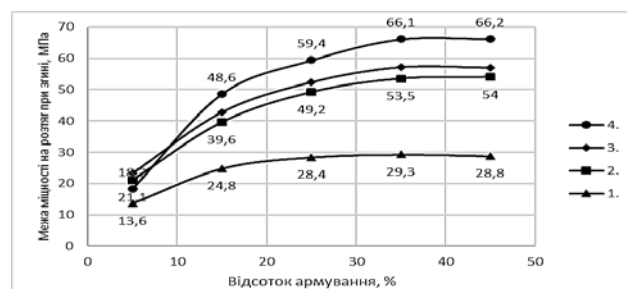


Рис. 1. Залежність межі міцності на розтяг при згині композицій на основі портландцементу з армуючим компонентом Ст1 від відсотка армування при їх твердінні у воді протягом 28 (1), 180 (2), 360 (3) та 720 (4) діб

Представлені результати показують, що у разі використання в якості армуючого компонента скла з низьким рівнем гідролітичної стійкості рівень міцності композиції постійно збільшується. У віці 28 діб максимальне значення цього показника становить 28,8 – 29,3 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$), а у віці 720 діб водного твердіння становить 66,1 – 66,2 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$). Аналогічна композиція, яка тверділа в гідрозатворі (рисунк 2), характеризується нижчим кінцевим рівнем міцності, значення якого у віці 720 діб становить 46,4 – 47,3 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$).

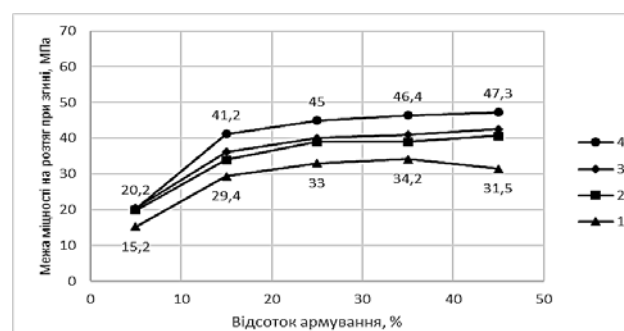


Рис. 2. Залежність межі міцності на розтяг при згині композицій на основі портландцементу з армуючим компонентом Ст1 від відсотка армування при їх твердінні в гідрозатворі протягом 28 (1), 180 (2), 360 (3) та 720 (4) діб

При цьому на рисунку 1 виділяється період тверднення від 28 до 180 діб, протягом якого відбувається суттєвий набір міцності з 28,8 – 29,3 МПа до 53,5 – 54 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$), тобто. у 1,8 – 1,9 рази. Зростання міцності за аналогічний період у композиції, що тверділа в гідрозатворі (рисунк 2), незначний і перевищує аналогічну характеристику у 28 добовому віці у 1,3 рази.

При використанні армуючого компонента Ст2, що характеризується більшою гідролітичною стійкістю, рівень міцності композиції при твердінні у воді (рисунк 3) та гідрозатворі (рисунк 4) становить відповідно 43,1 і 41,6 МПа через 720 діб твердіння.

Це вказує на те, що міцність композитів армованих штапиками із скла яке характеризуються більш високим класом гідролітичної стійкості

Таблиця 1

Гідролітичний клас скляних штапиків

Армуючий компонент	Гідролітичний клас скла армуючого компоненту	Позначення армуючого компоненту у тексті
Скло марки С90-1	III – тверді апаратні стекла	Ст1
Скло марки С52-1	I – стекла, що не змінюються водою	Ст2
Скло базальтове	I – стекла, що не змінюються водою	Ст3

практично не залежить від умов тверднення та не змінюється із збільшенням часу тверднення композицій на відміну від композицій на основі того ж в'язучого, але армованих штапиками із скла меншої гідролітичної стійкості (рисунки 1 та 2).

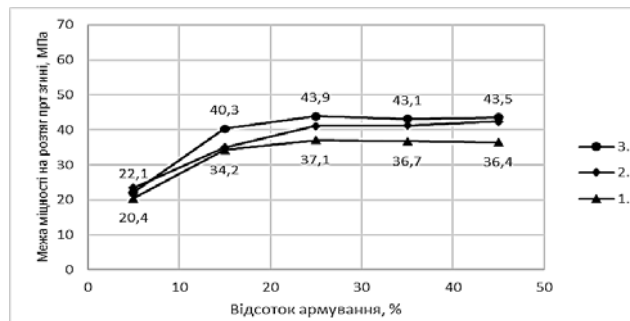


Рис. 3. Залежність межі міцності при згині композицій на основі портландцементу та армуючого компонента Ст2 від відсотка армування при їх твердінні у воді протягом 28 (1), 360 (2) та 720 (3) діб

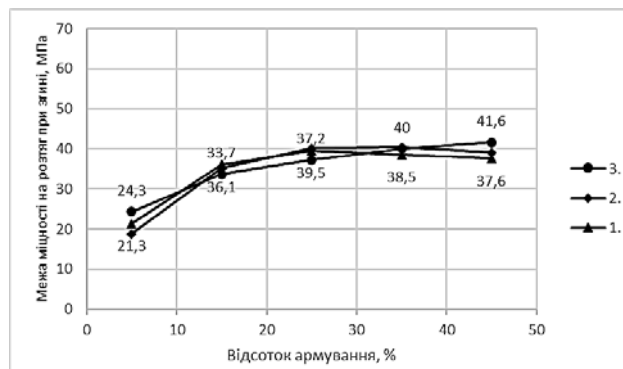


Рис. 4. Залежність межі міцності при згині композицій на основі портландцементу і армуючого компонента Ст2 від відсотка армування при їх твердінні в гідрозатворі протягом 28 (1), 360 (2) та 720 (3) діб

При порівнянні рівня міцності досліджуваних композицій після пропарювання при 95°C та після автоклавовання при температурі 175°C (рисунк 5) встановлено, що досліджуваний показник при використанні армуючого компонента Ст1 відрізняється несуттєво.

Відразу після пропарювання він становить 53,2 – 55,7 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$), а після автоклавовання – 48,0 – 51,6 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$).

У той же час, у разі використання армуючого компонента Ст2, рівень міцності композицій після тепловологої обробки становить 37,1 – 38,2 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$).

Твердіння досліджуваної композиції в умовах автоклавовання призводить до різкого зниження рівня її міцності до 14,8 – 17,9 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$), що є наслідком різниці у значенні

ТКЛР армуючого компонента Ст2 та матеріалу матриці.

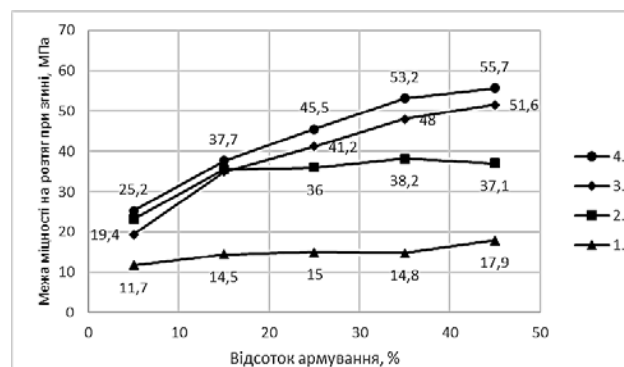


Рис. 5. Залежність межі міцності при згині композицій на основі портландцементу з армуючим компонентом Ст1 від відсотка армування після тепловологої обробки (4) та після автоклавовання (3) та на основі портландцементу та армуючого компонента Ст2 від відсотка армування після тепловологої обробки (2) та після автоклавовання (1)

При дослідженні кінетики зміни межі міцності при згині композицій на основі гіпсоглиноземистого цементу встановлено, що у разі використання армуючого компонента Ст1 при твердінні у воді (рисунк 6) максимальний рівень міцності зразків у віці 7 та 28 діб відрізняється незначно і становить 24,6 – 25,5 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$). У подальшому, у віці 360 діб, рівень міцності цих композицій збільшується до 32,5 – 34 МПа (при $\mu = 35 - 45\%$) і надалі, у віці 720 діб, практично не змінюється.

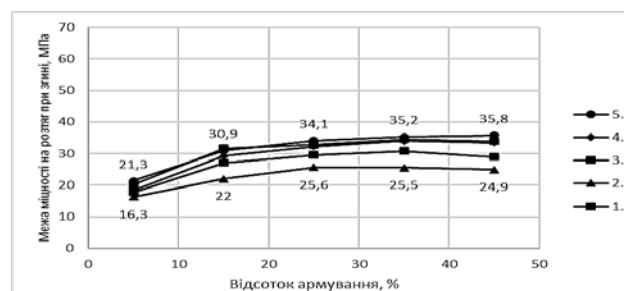


Рис. 6. Залежність межі міцності при згині композицій на основі гіпсоглиноземистого цементу та армуючого компонента Ст1 від відсотка армування при їх твердінні у воді протягом 28 (2), 360 (4) та 720 (5) діб, теж при використанні армуючого компонента Ст2 при твердінні у воді протягом 28 (1) та 360 (3) діб

У разі використання армуючого компонента Ст2, рівень міцності композицій на основі гіпсоглиноземистого цементу практично не відрізняється від аналогічних показників композицій з армуючим компонентом Ст1.

При порівнянні міцності композицій з однаковим терміном тверднення у воді на протязі 360 діб

(рисунок 7) встановлено, що у випадку використання портландцементу рівень гідралічної стійкості армуючого компонента впливає на міцність композицій та призводить до збільшення міцності до 57,0 – 57,2 МПа у композицій на основі Ст1 у порівнянні з композиціями на основі армуючого компонента Ст2, який характеризується вищим рівнем гідролітичної стійкості.

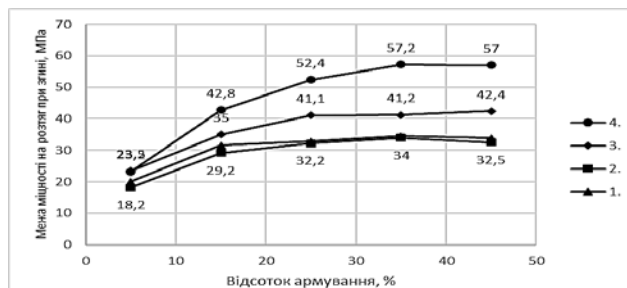


Рис. 7. Залежність межі міцності при згині композицій на основі портландцементу та армуючого компонента Ст1 (4) і Ст2 (3) та на основі гіпсоглиноземистого цементу та армуючого компонента Ст1 (2) і Ст2 (1) від відсотка армування після їх твердіння у воді протягом 360 діб

У випадку використання гіпсоглиноземистого цементу, продукти гідратації якого характеризуються низьким рівнем рН, гідралічна стійкість армуючого компонента не впливає на рівень міцності композицій із зміною терміну її твердіння.

Аналогічно, при збільшенні терміну твердіння композицій до 720 діб (рисунок 8) рівень міцності зразків на основі портландцементу та армуючого компонента Ст1 збільшується з 57,0 – 57,2 МПа до 66,1 – 66,2 МПа, тобто на 16%. У той же час, рівень міцності зразків на основі портландцементу та армуючого компонента Ст2 та на основі гіпсоглиноземистого цементу та армуючого компонента Ст1 практично не змінюється.

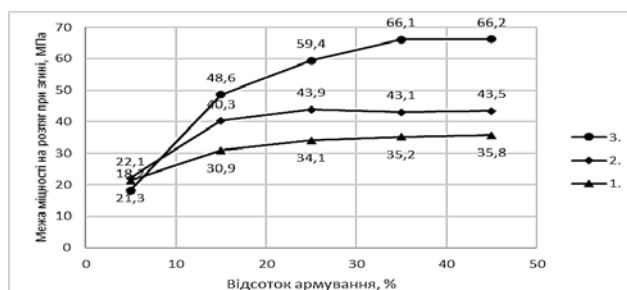


Рис. 8. Залежність межі міцності при згині від відсотка армування композицій на основі портландцементу та армуючого компонента Ст1 (3), на основі армуючого компонента Ст2 (2) та композицій на основі гіпсоглиноземистого цементу з армуючим компонентом Ст1 (1) після їхнього твердіння у воді протягом 720 діб

Визначаючи залежність впливу міцності матеріалу матриці на міцність композиції (рисунок 9) встановлено, що при використанні у якості матеріалу матриці гіпсового в'язучого, яке при твердненні характеризується відсутністю агресивного середовища по відношенню до скляного армуючого компонента, міцність матриці несуттєво впливає на міцність армованої композиції.

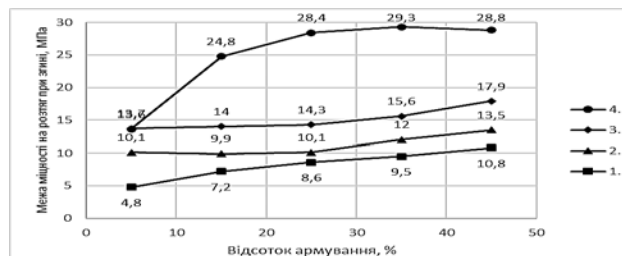


Рис. 9. Залежність межі міцності при згині від відсотка армування композицій на основі портландцементу та армуючого компонента Ст1 після твердіння у воді протягом 28 діб (4) і на основі армуючого компонента Ст1 та високоміцного гіпсового в'язучого при міцності матеріалу матриці при стиску та 38,0 МПа (3), 30 МПа (2) та 8,3 МПа (1)

Характер кривих, що описують залежність межі міцності при вигині від відсотка армування для композицій на основі низько випалювального гіпсу і α -напівгідрату вказує на те, що у разі відсутності хімічної взаємодії між армуючим компонентом і матрицею, кількість арматури незначно впливає на міцність композиції. Рівень міцності при 5% армування відрізняється від аналогічного показника композицій, що містять у своєму складі 45% армуючого компонента всього у 1,3 рази для зразків із міцністю матеріалу матриці при стиску 30 і 38 МПа. При міцності матриці 8,3 МПа максимальна міцність композиції знаходиться на рівні 9,5 – 10,8 МПа, при міцності матриці 30 МПа, відповідно 12 – 13,5 МПа, а при міцності матриці 38,0 МПа – 15,6 – 17,9 МПа.

У той час, у композиції на основі портландцементу, середовище якого при гідратації характеризується рН на рівні 12,5 – 13,0, максимальне міцність композиції становить, 28,8 – 29,3 МПа, при міцності матеріалу матриці 41,8 МПа, що свідчить про вплив процесів хімічної взаємодії у зоні контакту армуючого компонента та матриці на кінцевий рівень міцності композицій.

Одним з методів, що використовуються для характеристики хімічної стійкості силікатного скла, є метод визначення його гідролітичного класу, який характеризує швидкість розчинення поверхні скла і вилуговування з його складу спо-

лук лужних металів при підвищених температурах (98°C) у воді. Умови визначення гідролітичного класу скла (відповідно до методики, яка була використана в роботі) близькі до умов теплової обробки досліджуваних модельних систем. У зв'язку з чим, можна вважати, що інтенсивність процесів хімічної взаємодії компонентів композиції в зоні контакту повинна бути пропорційна інтенсивності розчинення поверхні армуючого компонента, яка характеризується гідролітичним класом скла яке використовується.

Наведені в таблиці 2 результати дослідження міцності пропарених композицій виготовлених на основі портландцементу з використанням скляних штапиків зі скла, що відносяться до різних гідролітичних класів, показують, що зі зменшенням гідролітичної стійкості скла, що використовується, міцність при згині досліджуваних композицій збільшується, що може бути пояснено зміцненням зони контакту за рахунок розчинення поверхні армуючого компонента. При цьому необхідно відзначити, що у разі використання в якості армуючого компонента штапиків з розчинного скла, руйнування зразків відбувалося за рахунок руйнування (сколювання) верхньої, стиснутої зони без руйнування нижнього, армованого шару.

Механічні властивості контактної зони характеризуються міцністю зчеплення – величиною зусилля, що припадає на одиницю площі кон-

такту, яку необхідно прикласти для відриву арматури від цементного каменю. Міцність зчеплення залежить від міцності контактної шару цементного каменю та інтенсивності взаємодії між компонентами композиції.

Міцність зчеплення арматури з матрицею визначали для зразків зі склом різного хімічного складу, що тверділи у воді та в гідрозатворі, а також після теплової та автоклавної обробки. Результати визначення міцності зчеплення армуючих компонентів з матеріалом матриці наведені в таблиці 3.

Аналіз даних таблиці показує, що максимальне значення міцності зчеплення армуючого компонента з матеріалом матриці характерно для модельних систем на основі портландцементу з армуючим компонентом Ст1 при твердінні у воді, значення міцності зчеплення для цих композицій у віці 720 діб складає 5,9 МПа.

При твердінні зразків аналогічного складу у гідрозатворі максимальне значення міцності зчеплення становить 4,45 МПа. Швидкому збільшенню міцності зчеплення в досліджуваних композиціях сприяє теплової та автоклавна обробка зразків. В цьому випадку міцність зчеплення армуючого компонента та матриці становить 5,14 та 4,98 МПа після відповідного виду обробки і незначно збільшується через 720 діб тверднення до 5,48 і 5,03 МПа відповідно.

Таблиця 2

Межа міцності при згині пропарених композицій при $\mu = 35\%$

Скло армуючого компоненту	Гідролітичний клас скла армуючого компоненту	Межа міцності при згині, МПа
Скло марки С52-1	I – стекла, що не змінюються водою	38,2
Скло базальтове	I – стекла, що не змінюються водою	34,2
Скло типу «пірекс»	II – стійке скло	39,8
Скло марки С90-1	III – тверді апаратні стекла	53,2
Скло розчинне	V – нестійке скло	70,1

Таблиця 3

Міцність зчеплення армуючого компонента з матрицею

В'яжуче та армуючий компонент	Умови твердіння (вид ТВО)	Позначення на рисунку 10	Після ТВО	Міцність зчеплення, МПа, після твердіння протягом, діб				
				7	28	180	360	720
Портландцемент та Ст1	у воді	ПЦ 1 в		2,9	3,10	5,61	5,90	5,90
	у гідрозатворі	ПЦ 1 г		-	3,20	4,14	4,10	4,45
	пропарювання	ПЦ 1 п	5,14	-	-	5,23	5,48	5,48
	автоклавовання	ПЦ 1 а	4,98	-	5,03	-	5,10	5,03
Портландцемент та Ст2	у воді	ПЦ 2 в		-	2,90	2,81	3,01	3,18
	у гідрозатворі	ПЦ 2 г		-	2,87	2,95	3,02	3,07
	пропарювання	ПЦ 2 п	4,64	-	4,47	4,38	4,52	4,62
	автоклавовання	ПЦ 2 а	2,10	-	2,07	2,00	2,21	2,14
Гіпсоглиноземистий цемент та Ст1	у воді	ГЦ 1 в		-	2,24	-	2,67	2,55
Гіпсоглиноземистий цемент та Ст2	у воді	ГЦ 2 В		1,2	2,36	-	2,50	2,45

У разі використання армуючого компонента Ст2 міцність зчеплення як при твердінні у воді (2,90 – 3,18 МПа), так і при твердінні в гідрозатворі (2,87 – 3,07 МПа) протягом досліджуваного періоду залишається нижчою за аналогічний показник у композицій вище розглянутого складу.

Різде підвищення міцності зчеплення у зразків цього складу відбувається при їхньому пропарюванні (4,38 – 4,63 МПа). Автоклавна обробка досліджуваних зразків призводить до різкого зниження міцності зчеплення армуючого компонента та матриці до рівня 2,0 – 2,21 МПа.

Таке зниження міцності зчеплення армуючого компонента і матриці обумовлює різке зниження межі міцності при згині досліджуваних композицій і відображене в результатах, представлених на рисунку 5 та є наслідком великої різниці у значенні ТКЛР армуючого компонента і матриці. Причому вплив невідповідності ТКЛР матеріалу матриці та армуючого компонента не проявляється при пропарюванні (95°C), а стає помітним при автоклавованні зразків (175°C).

Результати досліджень міцності зчеплення у зразках досліджуваних модельних систем на основі гіпсоглиноземистого цементу показують, що в даному випадку, незалежно від виду скла, міцність зчеплення характеризується відносно низьким значенням, величина якого протягом 720 діб твердіння практично не змінюється і знаходиться в межах 2, 24 – 2,67 МПа при використанні армуючого компонента Ст1 і 1,2 – 2,50 МПа для Ст2. Низький рівень цього показника та його незначна зміна з часом тверднення є причиною незначних змін межі міцності при згині даного виду композиції з часом (рисунк 9).

На рисунку 10 представлена залежність межі міцності при згині модельних систем від міцності зчеплення армуючого компонента і матриці, побудована для зразків з відсотком армування 35% на основі портландцементу з армуючим компонентом Ст1, що тверділи у воді, в гідрозатворі і пройшли тепловолу обробку пропарюванням (95°C) та автоклавованням (175°C), а також для

зразків з відсотком армування 35% для композицій на основі портландцементу та армуючого компонента Ст2 та на основі гіпсоглиноземистого цементу на основі армуючих компонентів Ст1 та Ст2 які тверділи у воді.

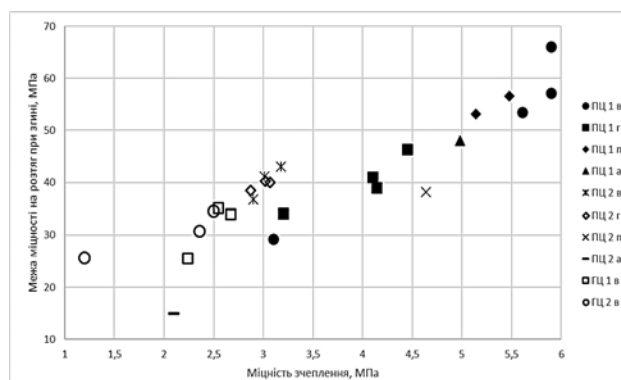


Рис. 10. Залежність межі міцності при згині модельних систем від міцності зчеплення армуючого компонента і матриці для досліджуваних модельних систем з відсотком армування 35%

Представлена залежність підтверджує взаємозв'язок між величиною міцності зчеплення армуючого компонента та матриці та значенням межі міцності при згині досліджуваних модельних систем.

Рентгенофазовим аналізом (таблиця 4) матеріалу матриці та продуктів зони контакту армуючого компонента та матеріалу матриці досліджуваних композицій встановлено, що кількість портландиту ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) у складі новоутворень, яке оцінювалося за інтенсивністю відповідних характеристичних максимумів, максимально в матеріалі матриці після автоклавовання. При цьому, як I_0 приймалася інтенсивність відповідних характеристичних максимумів портландиту на дифрактограмі матеріалу матриці після автоклавовання. Це є наслідком інтенсифікації процесів гідратації вихідних клінкерних мінералів за умов підвищеної температури.

Водночас інтенсивність характеристичних максимумів портландиту у зоні контакту матриці з армуючим компонентом Ст1 знижується до 44 – 75 %, у зоні

Таблиця 4

Зміна інтенсивності характеристичних максимумів портландиту (I_n/I_0 , %) на дифрактограмах матеріалу матриці та зони контакту досліджуваних композицій на основі портландцементу

Досліджувані зразки	I_n/I_0 портландиту на дифрактограмах зразків після					
	пропарювання			автоклавовання		
	d=4,93нм	d=2,63нм	d=1,93нм	d=4,93нм	d=2,63нм	d=1,93нм
Матеріал матриці	50	58	62	100	100	100
Зона контакту з Ст1	31	39	39	60	44	75
Зона контакту з Ст2	48	52	58	80	92	90
Зона контакту з Ст3	46	50	53	76	88	90

контакту з армуючим компонентом Ст2 до 80 – 92 %. Таке зниження пропорційно гідролітичному класу використовуваного скла і, вочевидь, є наслідком взаємодії $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з поверхнею скла. Інтенсивність характеристичних максимумів портландиту в зоні контакту матриці та армуючого компонента Ст3 (76 – 90 %) аналогічна інтенсивності характеристичних максимумів у системі портландцемент – армуючий компонент Ст2, що є наслідком належності цих стекл до одного гідролітичного класу.

У пропарених композиціях інтенсивність характеристичних максимумів портландиту в матеріалі матриці (50 – 62 %) нижча, ніж на дифрактограмах зразків після автоклавування, однак, і в цьому випадку зберігається раніше виявлена закономірність. Інтенсивність характеристичних максимумів портландиту на дифрактограмах новоутворень зони контакту зі склом Ст2 (48 – 58 %) і склом Ст3 (46 – 53 %) вища, ніж на дифрактограмах новоутворень зони контакту зі склом Ст1. Це свідчить про більш інтенсивне протікання процесів хімічної взаємодії $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з поверхнею армуючого компонента Ст1.

Рентгенофазовим аналізом модельних зразків (таблиця 5), виготовлених на основі сумішей портландцементу і тонкомеленого до питомої поверхні $310 \text{ м}^2/\text{кг}$ скла відповідного армуючого компонента

встановлено, що після їх пропарювання протягом 6 годин кількість портландиту у цементному камені з добавкою тонкомеленого скла зменшується порівняно з цементним каменем без добавок.

При цьому у якості I_0 приймалася інтенсивність відповідних характеристичних максимумів портландиту на дифрактограмах чистого цементного каменю після його пропарювання протягом 60 годин. Інтенсивність характеристичних максимумів портландиту на дифрактограмах зразків на основі чистого портландцементу становить 50 – 83 %, тоді як аналогічне значення для зразків із добавкою скла складу Ст1 становить 7 – 15 %, складу Ст2 – 13 – 18 % та складу Ст3 – 12 – 15 %. Збільшення тривалості пропарювання досліджуваних модельних систем до 60 годин призводить до повного зникнення характеристичних максимумів портландиту на дифрактограмах зразків з добавкою скла всіх досліджуваних складів.

Ці результати підтверджуються даними термографічного аналізу (таблиця 6) відповідно до яких кількість води, що видаляється в температурному інтервалі 500 – 580°C за рахунок дегідратації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у зразках приготовлених з добавками тонкомеленого скла знижується до 0,47 мас. % при величині аналогічного значення для чистого цементного каменю 1,68 мас. %. При пропарю-

Таблиця 5

Зміна інтенсивності характеристичних максимумів портландиту (I_n/I_0 , %) на дифрактограмах матеріалу матриці та модельних складів портландцементу з тонкомолотим армуючим компонентом після тепловологої обробки

Добавка $S_{\text{шт}}=310 \text{ м}^2/\text{кг}$	Кількість добавки, %	I_n/I_0 портландиту на дифрактограмах зразків після					
		пропарювання на протязі 6 годин			пропарювання на протязі 60 годин		
		d=4,93нм	d=2,63нм	d=1,93нм	d=4,93нм	d=2,63нм	d=1,93нм
Без добавки	0	83	69	50	100	100	100
Ст1	50	7	15	10	-	-	-
Ст2	50	14	18	13	-	-	-
Ст3	50	15	13	12	-	-	-

Таблиця 6

Добавка S _{шт} =310 м²/кг	Кількість добавки, %	Втрата маси у температурному інтервалі			
		500 – 580°C		20 – 1000°C	
		мг	у % від вихідної навішування	мг	у % від вихідної навішування
після пропарювання на протязі 6 годин					
Без добавки	0	14,4	1,67	168,0	19,72
Ст1	50	4,4	0,47	92,3	10,76
Ст2	50	4,6	0,47	80,1	9,41
Ст3	50	4,2	0,47	79,2	9,28
після пропарювання на протязі 60 годин					
Без добавки	0	18,2	2,10	190,5	22,20
Ст1	50	-	-	99,4	11,65
Ст2	50	-	-	104,3	12,29
Ст3	50	-	-	117,9	13,85

ванні модельних зразків протягом 60 годин ендоефект в області температур 500 – 580°C повністю зникає, що свідчить про відсутність $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у новоутвореннях досліджуваних зразків.

Наведені результати показують, що кількість $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у зоні контакту матриці та армуючого компонента менша, ніж безпосередньо у матеріалі матриці. Зниження кількості $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в зоні контакту з армуючим компонентом є наслідком взаємодії портландиту з поверхнею скла.

Інтенсивність цього процесу залежить від складу скла, який визначає його гідролітичну стійкість та залежить від умов твердіння композиції. При цьому збільшення температури або тривалості тепловологій обробки інтенсифікує процеси хімічної взаємодії в зоні контакту армуючого компонента та матриці.

Висновки. Встановлено, що зі зменшенням гідролітичної стійкості скла, що використовується, міцність при згині досліджуваних композицій збільшується, що може бути пояснено зміцненням зони контакту за рахунок вилугування оксидів скла з поверхні армуючого компонента та їхньої наступної взаємодії з продуктами гідратації в'язучого.

У разі використання армуючого компоненту з показником ТКЛР близьким до значення аналогічної характеристики матеріалу матриці, міцність зразків на основі портландцементу збільшується при їхній тепловологій обробці (98°C) та при автоклавуванні. У разі використання армуючого компоненту ТКЛР якого суттєво відрізняється від аналогічної характеристики матеріалу матриці, міцність зразків після автоклавної обробки характеризується меншими значеннями у порівнянні з пропареними зразками, що свідчить про наявність деструктивних процесів, пов'язаних з руйнуванням зони контакту при охолодженні.

У разі використання у якості матеріалу матриці в'язучого яке характеризується більш високим рівнем агресивності до кремнезем вміщуючого компоненту (портландцементу), рівень міцності зразків залежить від гідролітичної стійкості армуючого компоненту. У разі використання у якості матеріалу матриці гіпсоглиноземистого цементу, продукти гідратації якого характеризуються рН на рівні 10 -11, рівень міцності дослідних зразків практично не залежить від гідролітичної стійкості скла армуючого компоненту.

Список літератури:

1. Baybure H Glass Fiber Reinforced Concrete in Construction: A Review of Advances, Challenges, and Future Prospects. J. Civil Eng. Urban., 14 (4): 405– 422. DOI: <https://dx.doi.org/10.54203/jceu.2024.43>.
- 2 Global Cement and Concrete Association. Код доступу: <https://gccassociation.org/>
3. Композитні та порошкові матеріали: навчальний посібник / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова; за заг. ред. П.П. Савчука. – Луцьк: 2017. – 368 с. ISBN 978-617-7070-88-6
4. Bentur, A., Mindess. S. Fiber Reinforced Cementitious Composites, Second Edition, Taylor and Francis Group, London and New York, 2007. 594 p.
5. Majumdar A.I., West J.M. Larner L.J. Properties of glass fibres in cement environment. J. Mater. Sci.-1977.- №5. P. 927-936.
6. Залежність інтенсивності процесів корозії армуючого компоненту від параметрів пористості композиту/ Глуховський В.В. – Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 36 (75) № 3 2025. С. 211-218. DOI <https://doi.org/10.327822663-59412025.3.128>.
7. Meimei Song, Phil Purnell, Ian Richardson. Microstructure of interface between fiber and matrix in 10-year aged GRC modified by calcium sulfoaluminate cement. Cement and Concrete Research, Volume 76, 2015, P. 20-26, ISSN 0008-8846. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.011>.

Glukhovskiy V.V. INTERPHASE INTERACTION IN THE CONTACT ZONE AND ITS ROLE IN STRENGTHENING OF COMPOSITE MATERIALS

The article presents the results of a study of the dependence of the physical and mechanical characteristics of glass fiber concrete composition models on the intensity of chemical interaction processes in the contact zone of the reinforcing component – matrix.

Enclosing materials based on inorganic binders and glass fibers are high-performance composite materials that are characterized by high tensile strength, corrosion resistance and durability compared to conventional concrete. Products based on this material are characterized by low weight and aesthetic flexibility, which makes it particularly suitable for facade cladding, prefabricated components and industrial applications.

A number of studies have shown that the inclusion of pozzolanic additives, such as silica fume, metakaolin, and fly ash, in glass fiber reinforced concrete composites improves their mechanical properties and durability, reducing problems associated with aging. Nano-sized additives, in particular single-walled carbon nanotubes, contribute to further improvement in processability, corrosion resistance, and interfacial bonding in the reinforcing component-

matrix interface. It has also been shown that the characteristics of glass fiber reinforced concrete depend on the type, content and size of the glass fibers used, in particular, alkali-resistant glass fibers are effective in preventing the formation of microcracks at an early stage, thereby improving tensile and flexural strength. Experimental studies confirm that changes in fiber characteristics directly affect mechanical properties [1].

The subject of the research is the study of the dependence of the operational properties of compositions based on inorganic binders and mineral fibers on the processes of chemical interaction in the contact zone between the new formations of the hardening inorganic binder and the reinforcing component using model systems.

The objects of the study used glass-cement compositions based on reinforcing components made of glasses of different hydrolytic resistance and matrices based on inorganic binders, which differ significantly in the composition of hydration products and the degree of aggressiveness of the environment in relation to the material of the reinforcing components.

Keywords: *dispersion-reinforced composite materials, glass fibers, glass beads, bending tensile strength, Portland cement, alumina cement, building gypsum, α -modified gypsum binder.*

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 621.436

DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/17>**Ілляшенко Ю.В.**<https://orcid.org/0009-0007-6114-2968>

Національний університет «Київський авіаційний інститут»

Єфименко В.В.<https://orcid.org/0000-0002-4903-6173>

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИННИХ МОТОРНИХ ОЛИВ З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ ЇХ ЯКОСТІ

У статті розглянуто екологічні аспекти використання рослинних моторних олив з урахуванням зміни їх показників якості у процесі експлуатації. Проаналізовано основні фізико-хімічні властивості рослинних олив, що впливають на їх екологічність. Проведено порівняльний аналіз зміни якості рослинних моторних олив порівняно з мінеральними та синтетичними аналогами з екологічної точки зору. Моторні оливи безпосередньо впливають на екологічний стан довкілля на всіх етапах виробництва, експлуатації та утилізації. Основними екологічно значущими характеристиками моторних олив є походження сировини, біорозкладність, токсичність продуктів деградації, а також ступінь екологічного ризику у разі витоків або неправильного поводження з відпрацьованими матеріалами. Традиційні моторні оливи, виготовлені з нафтопродуктів, характеризуються низькою здатністю до біологічного розкладання та тривалим негативним впливом на ґрунти і водні об'єкти. У процесі експлуатації вони зазнають окиснювальної та термічної деградації, що супроводжується утворенням токсичних сполук, які ускладнюють їх подальшу утилізацію. Рослинні оливи є перспективною альтернативою традиційним нафтовим мастильним матеріалам, ці оливи мають значний потенціал для використання в різних галузях техніки. Вони виробляються з відновлюваної сировини, мають високу біорозкладність і низьку токсичність, що значно знижує екологічне навантаження у разі витоків або потрапляння у навколишнє середовище. Рослинні моторні оливи характеризуються рядом фізико-хімічних властивостей, які безпосередньо впливають на їх експлуатаційні та екологічні характеристики. Показано, що застосування рослинних олив за умови оптимізації їх складу та контролю експлуатаційних характеристик сприяє зниженню негативного впливу на навколишнє середовище та підвищенню екологічної безпеки транспортних засобів. Подальший розвиток технологій модифікації олив та оптимізації складу біомастильних матеріалів сприятиме розширенню сфери їх застосування, зменшенню негативного впливу на довкілля та підвищенню рівня екологічної безпеки двигунів і механізмів.

Ключові слова: рослинні моторні оливи, екологічна безпека, показники якості, деградація олив, біорозкладність, окиснювальна стабільність, експлуатаційні властивості, вплив на довкілля.

Постановка проблеми. У сучасних умовах посилення екологічних вимог та зменшення запасів викопних ресурсів особливої актуальності набуває пошук екологічно безпечних альтернатив традиційним нафтовим паливно-мастильним матеріалам. Екологічність моторних олив в останні роки привертає все більшу увагу у зв'язку з посиленням вимог до охорони навколишнього середовища та пошуком альтернатив традиційним нафтовим продуктам [1]. Моторні оливи безпосередньо впливають на екологічний стан довкілля на всіх етапах виробництва, експлуатації та утилізації. Особливо актуальними для

досліджень є рослинні олії, які є перспективною сировиною для виробництва біомастильних матеріалів завдяки своїй відновлюваності, біорозкладності та низькій токсичності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Історично моторна олива була простою сумішшю базової оливи та присадок, що використовувалися для змащування деталей двигуна, зменшення тертя, очищення, охолодження та захисту двигуна. Однак сучасні синтетичні моторні оливи це – складні суміші базових олив та присадок, призначених для виконання різноманітних завдань, зокрема, розділення та змащення рухомих час-



тин, зменшення зносу та охолодження деталей двигуна. Олива допомагає запобігти утворенню відкладень на внутрішніх деталях двигуна, підвищити паливну ефективність двигуна, забезпечити захист в широкому діапазоні температур [2]. Таким чином, сучасні моторні оливи виконують не тільки змащувальні функції, а й відповідають за захист двигуна від зносу та покращення його працездатності.

Традиційні мінеральні моторні оливи, виготовлені з нафтопродуктів, характеризуються низькою здатністю до біологічного розкладання та тривалим негативним впливом на ґрунти і водні об'єкти. У процесі експлуатації вони зазнають окиснювальної та термічної деградації, що супроводжується утворенням токсичних сполук, які ускладнюють їх подальшу утилізацію. Синтетичні моторні оливи демонструють вищу стабільність експлуатаційних властивостей і меншу кількість шкідливих продуктів зносу, однак також залишаються потенційно небезпечними для довкілля через обмежену біорозкладність і необхідність спеціальних методів переробки [3].

Рослинні оливи є перспективною альтернативою синтетичним моторним оливам. Вони виробляються з відновлюваної сировини, мають високу біорозкладність і низьку токсичність, що значно знижує екологічне навантаження у разі витоків або потрапляння у навколишнє середовище. Водночас їх застосування потребує врахування обмежень, пов'язаних із нижчою окиснювальною стабільністю та чутливістю до температурних режимів, що обумовлює необхідність використання ефективних присадок і контролю якості в процесі експлуатації. На ефективне використання рослинних моторних оли в двигунах внутрішнього згорання може суттєво вплинути зміна показників якості в процесі експлуатації, тому даний процес потребує комплексного аналізу як з технічного, так і екологічного погляду.

Рослинні оливи є тригліцеридами вищих жирних кислот і мають природну полярність, що забезпечує високу змочувальну здатність та ефективне утворення змащувальної плівки на поверхнях тертя. Це сприяє зниженню коефіцієнта тертя та зношування механічних вузлів, що є однією з ключових переваг біомастильних матеріалів порівняно з мінеральними або синтетичними аналогами. Окрім того, рослинні олії характеризуються високим індексом в'язкості, що забезпечує стабільність змащувальних властивостей у широкому температурному діапазоні.

Важливою перевагою рослинних оли в є їхня екологічна безпечність. У разі потрапляння в ґрунт

або водне середовище вони швидко біодеградують, не утворюючи токсичних сполук і не спричиняють тривалого негативного впливу на екосистеми. Саме тому біомастильні матеріали на основі рослинних оли в є особливо актуальними для застосування в сільському господарстві, лісовій техніці, гідравлічних системах та інших галузях, де ризик витоків змащувальних матеріалів є високим.

Разом із тим, масове використання рослинних оли в як змащувальних матеріалів має певні експлуатаційні недоліки. Наприклад, недостатня окиснювальна стабільність, схильність до термоокиснювальної деградації, а також високі температури застигання обмежують використання таких оли в за низьких температур. Наявність подвійних зв'язків у складі ненасичених жирних кислот сприяє швидкому окисненню, що призводить до утворення смол, кислот і погіршення змащувальних властивостей.

Для усунення зазначених недоліків активно розробляються методи хімічної та біотехнологічної модифікації рослинних оли в. Окрему увагу приділяють використанню ферментативних каталізаторів і йонних рідин. Додатковим напрямом підвищення експлуатаційних характеристик рослинних мастильних матеріалів є застосування екологічно безпечних присадок, які покращують антиокиснювальні, протизношувальні та антикорозійні властивості. Поєднання біооснов із сучасними пакетами присадок дозволяє створювати конкурентоспроможні змащувальні матеріали, що за низькою показників не поступаються синтетичним оливам.

Серед широкого спектра рослинних оли в, що розглядаються як сировина для біомастильних матеріалів, особливу увагу привертають пальмова та ріпакова олії, які завдяки своєму хімічному складу та експлуатаційним властивостям є найбільш перспективними для технічного застосування. Пальмова олія є однією з найбільш поширених рослинних оли в у світі та розглядається як перспективна сировина для виробництва біомастильних матеріалів. Вона отримується з плодів олійної пальми (*Elaeis guineensis*) (рис. 1) і характеризується високою доступністю, відносно низькою собівартістю та стабільною якістю, що робить її привабливою для технічного застосування. Завдяки відновлюваному походженню та здатності до біологічного розкладання пальмова оли ва відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки.

З хімічної точки зору пальмова олія складається переважно з тригліцеридів насичених і ненасичених жирних кислот, серед яких домінують пальмітинова та олеїнова кислоти. Такий склад забезпечує достатню полярність молекул,

що сприяє ефективному адсорбуванню на металевих поверхнях і формуванню стійкої змащувальної плівки. У результаті зменшується коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування контактних поверхонь, що є важливим для роботи механізмів у режимах граничного тертя.



Рис. 1. Плоди *Elaeis guineensis*

Пальмова олія характеризується високим індексом в'язкості, що забезпечує відносну стабільність її реологічних властивостей при зміні температури. Це дає змогу підтримувати ефективне змащування за різних умов експлуатації. Крім того, вона має добрі протизношувальні властивості та здатність знижувати шум і вібрації у вузлах тертя, що підтверджується результатами трибологічних досліджень.

Водночас використання пальмової олії як мастильного матеріалу має певні недоліки. Одним із головних недоліків є недостатня окиснювальна стабільність, зумовлена наявністю ненасичених жирних кислот, що робить олію чутливою до термоокиснювальної деградації. Це може призводити до утворення кислотних продуктів, лаків і відкладень, які погіршують експлуатаційні характеристики оливи. Також вона має порівняно високу температуру застигання, що обмежує її використання в умовах низьких температур.

Для розширення можливостей застосування пальмової оливи в змащувальних системах широко застосовуються методи її модифікації, зокрема трансестерифікація, етерифікація та синтез складних ефірів. Модифіковані продукти на основі пальмової олії демонструють покращену термічну та окиснювальну стабільність, нижчу температуру застигання та кращі протизношувальні властивості. Додаткове введення антиокиснювальних і протизношувальних присадок дозволяє отримувати біомасильні матеріали

з експлуатаційними характеристиками, близькими до мінеральних і синтетичних оливи.

Ріпакова олія є також перспективною для застосування у складі біомасильних матеріалів завдяки сприятливому поєднанню фізико-хімічних, трибологічних та екологічних властивостей. Вона отримується з насіння ріпаку (*Brassica napus*) (рис. 2) і відзначається високою доступністю в аграрних регіонах, що забезпечує стабільну сировинну базу для виробництва біомасил. Відновлюване походження та здатність до біологічного розкладання зумовлюють її відповідність сучасним вимогам екологічної безпеки.



Рис. 2. *Brassica napus*

Хімічний склад ріпакової олії характеризується високим вмістом мононенасичених жирних кислот, передусім олеїнової кислоти, що позитивно впливає на мастильні властивості. Полярна природа тригліцеридів сприяє утворенню міцної адсорбційної плівки на металевих поверхнях, забезпечуючи ефективне зниження коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування. Це робить ріпакову олію особливо придатною для використання в режимах граничного та змішаного тертя.

Однією з ключових переваг ріпакової олії є її високий індекс в'язкості, що забезпечує стабільність реологічних характеристик у широкому температурному діапазоні. Завдяки цьому змащувальні властивості зберігаються як за помірних, так і за підвищених температур експлуатації. Крім того, ріпакова олія демонструє добрі протизношувальні та антифрикційні властивості, що підтверджено численними експериментальними трибологічними дослідженнями.

Разом із тим, як і більшість рослинних оливи, ріпакова олія має певні експлуатаційні обмеження. Основними недоліками є обмежена окиснювальна стабільність і схильність до термоокиснювальної деградації, що може призводити до утворення

кислотних продуктів, смол і відкладень. Такі процеси негативно впливають на довговічність масляного матеріалу та обмежують термін його роботи. Також природна ріпакова олія потребує покращення низькотемпературних властивостей для застосування в умовах холодного клімату.

З метою підвищення експлуатаційних характеристик ріпакової олії широко застосовуються методи хімічної модифікації. Додаткове використання антиокиснювальних, протизношувальних і антикорозійних присадок дозволяє отримувати біомасильні матеріали, здатні конкурувати з мінеральними та синтетичними оливами.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у науковому обґрунтуванні екологічної доцільності використання рослинних моторних олив шляхом встановлення закономірностей зміни їх фізико-хімічних та експлуатаційних показників у процесі експлуатації та оцінювання впливу цих змін на екологічні характеристики роботи двигунів.

Виклад основного матеріалу. Рослинні моторні оливи характеризуються рядом фізико-хімічних властивостей, які безпосередньо впливають на їх експлуатаційні та екологічні характеристики. До таких властивостей відносяться в'язкісно-температурні параметри, кислотне число, стійкість до окиснення, схильність до утворення відкладень та ступінь біорозкладності [4-7]. У процесі роботи двигуна олива піддається впливу високих температур, кисню з повітря, продуктів згоряння палива та механічних навантажень, що призводить до поступової деградації її структури. В результаті окисних процесів зростає кислотність оливи змінюється її в'язкість і знижується змащувальна здатність, що може негативно

вплинути на деталі двигуна і збільшити кількість шкідливих викидів у навколишнє середовище [8-9].

Рослинні моторні оливи характеризуються найвищою біорозкладністю та найнижчою токсичністю продуктів деградації, що зумовлює мінімальний негативний вплив на ґрунти та водні об'єкти у разі витоків або утилізації. Водночас для них характерна нижча окиснювальна стабільність і більш інтенсивне зростання кислотного числа, що обмежує тривалість ефективної експлуатації без застосування спеціальних антиокиснювальних присадок та регулярного контролю показників якості.

Мінеральні моторні оливи, навпаки, демонструють значні зміни в'язкісних характеристик і підвищений екологічний ризик у разі потрапляння в довкілля, що пов'язано з їх низькою біорозкладністю та високою стійкістю до природних процесів розкладання (табл. 1). Синтетичні оливи займають проміжне положення, поєднуючи високу стабільність експлуатаційних властивостей із помірним рівнем екологічної безпеки. Таким чином, результати порівняльного аналізу підтверджують доцільність використання рослинних моторних олив у контексті зменшення екологічного навантаження за умов оптимізації їх складу та дотримання регламентів експлуатації [9-10].

З екологічного погляду зміна якості рослинних моторних олив має подвійний характер. З одного боку, продукти їх розкладання, як правило, менш небезпечні для навколишнього середовища в порівнянні з продуктами деградації мінеральних та синтетичних олив, оскільки рослинні олії мають високу здатність до біологічного розкладання. З іншого боку, при значному підвищенні

Таблиця 1

Екологічні характеристики рослинних моторних олив та зміна їх властивостей під час експлуатації

Показник	Рослинні моторні оливи (біооливи)	Мінеральні моторні оливи	Екологічне значення
Походження сировини	Виробляються з рослинних олій (ріпакова, соєва, соняшникова)	Отримуються з нафти	Рослинні оливи є відновлюваним ресурсом
Біорозкладність	Висока (до 90–98 %)	Низька (20–40 %)	Менше накопичуються у ґрунті та воді
Токсичність для довкілля	Низька	Вища через нафтопродукти та присадки	Зменшує негативний вплив на екосистеми
Викиди при використанні	Менша кількість шкідливих продуктів	Більша кількість токсичних сполук	Покращення екологічної безпеки
Зміна в'язкості під час роботи	Може змінюватися через окиснення	Більш стабільна	Потребує контролю технічного стану
Окиснювальна стабільність	Нижча, можливе швидше старіння	Вища	Впливає на термін служби оливи
Температурна стабільність	Обмежена при високих температурах	Вища термостійкість	Важлива для роботи двигуна
Утилізація відпрацьованої оливи	Простіша, менший екологічний ризик	Потребує складнішої утилізації	Зменшує забруднення довкілля

експлуатаційних навантажень можливе збільшення витрати оливи, утворення нагару та зростання викидів забруднюючих речовин, що знижує загальний екологічний ефект від їх застосування. Тому важливою умовою екологічно безпечного використання рослинних моторних олив є контроль їхнього стану в процесі експлуатації та своєчасна заміна оливи [11-13].

При правильному відборі сировинної бази, використанні антиокиснювальних та протизношувальних присадок, а також при оптимальних режимах роботи двигуна рослинні моторні оливи здатні забезпечити прийнятний рівень експлуатаційної надійності та одночасно знизити негативний вплив на навколишнє середовище. Їх застосування дозволяє зменшити забруднення ґрунтів та водних ресурсів у разі витоків та утилізації, а також скоротити залежність від невідновлюваних нафтових ресурсів.

Висновки. Пальмова та ріпакова олії є перспективною базовою сировиною для виробництва біомастильних матеріалів, особливо для застосування в умовах помірних температур і в системах, де екологічна безпечність має першочергове значення. Подальший розвиток технологій їх модифікацій та оптимізації рецептур сприятиме розширенню сфери застосування біомастил і зменшенню негативного впливу мастильних матеріалів на навколишнє середовище.

Таким чином, своєчасна заміна рослинних моторних олив у процесі експлуатації двигунів

внутрішнього згорання є ключовим фактором при оцінці їхньої екологічної ефективності та перспектив впровадження в сучасні транспортні та енергетичні системи. Комплексний підхід до оцінювання екологічних характеристик моторних олив є необхідною умовою зменшення негативного впливу транспортних і промислових систем на довкілля.

Дослідження у сфері екологічних аспектів використання рослинних моторних олив доцільно пов'язувати з поглибленим вивченням закономірностей зміни їх якості в реальних умовах експлуатації двигунів та впливу цих змін на екологічні показники транспортних і стаціонарних енергетичних установок. Актуальним напрямом є проведення довготривалих експериментальних досліджень деградації фізико-хімічних і трибологічних властивостей рослинних олив з урахуванням режимів навантаження, температурних факторів і типів двигунів. Перспективними також є дослідження ефективності сучасних біорозкладних та антиокиснювальних присадок, спрямованих на підвищення стабільності рослинних моторних олив і зменшення негативного екологічного впливу продуктів їх старіння. Окрему увагу доцільно приділити комплексній оцінці життєвого циклу рослинних моторних олив – від виробництва сировини до утилізації відпрацьованих продуктів – з метою кількісного обґрунтування їх екологічних переваг порівняно з традиційними оливами.

Список літератури:

1. Abdul R. N. Prospects of plant-based trimethylolpropane esters in the biolubricant formulation for various applications: A review. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2022. P. 10. DOI:10.3389/fmech.2022.833438.
2. Afonso I. S. Conventional and recent advances of vegetable oils as metalworking fluids (MWFs). *Lubricants*. 2023. Vol. 11. № 4. P. 160. DOI:10.3390/lubricants11040160.
3. Borah D. Bioremediation and biomass production with the green microalga *Chlorococcum humicola* and textile mill effluent (TE). *Proceedings of the National Academy of Sciences, India. Section B: Biological Sciences*. 2020. Vol. 90 № 2. P. 415–423. DOI:10.1007/s40011-019-01112-x.
4. He C. Modification of cottonseed oil with lipases and ionic liquid catalysts to prepare highly branched lubricant with low pour point and high viscosity. *Biochemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 192. Art. 108815. DOI:10.1016/j.bej.2023.108815.
5. Mahmud D. N. F. Influence of contact pressure and sliding speed dependence on the tribological characteristics of an activated carbon–epoxy composite derived from palm kernel under dry sliding conditions. *Friction*. 2019. Vol. 7. P. 227–236. DOI:10.1007/s40544-018-0205-y.
6. Bhatia S. K., Bhatia R. K., Jeon J. M. An overview on advancements in biobased transesterification methods for biodiesel production: Oil resources, extraction, biocatalysts, and process intensification technologies. *Fuel*. 2021. Vol. 285. Art. 119117. DOI:10.1016/j.fuel.2020.119117.
7. García Martín J. F. Recent developments in Jatropha research. *Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, Inc.* 2021. ISBN 978-1-53619-132-5. DOI:10.3390/pr9050797.
8. Álvarez-Mateos P., García-Martín J. F., Guerrero-Vacas F. J. Valorization of a high-acidity residual oil generated in the waste cooking oils recycling industries. *Grasas y Aceites*. 2019. Vol. 70. Art. e335. DOI:10.3989/gya.1179182.

9. Kumar H., Sarma A. K., Kumar P. A comprehensive review on preparation, characterization, and combustion characteristics of microemulsion-based hybrid biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 117. Art. 109498. DOI:10.1016/j.rser.2019.109498.
10. Cuevas M., García Martín J. F., Bravo V. Ethanol production from olive stones through liquid hot water pre-treatment, enzymatic hydrolysis and fermentation. Influence of enzyme loading, and pre-treatment temperature and time. *Fermentation*. 2021. Vol. 7. Art. 25. DOI:10.3390/fermentation7010025.
11. Khan M., Nizami A. S., Rashid U., Naqvi M. R. Editorial: Waste biorefineries: Future energy, green products and waste treatment. *Frontiers in Energy Research*. 2019. Vol. 7. P. 3–5. DOI:10.3389/fenrg.2019.00055
12. Han Y., Gholizadeh M., Tran C. C., et al. Hydrotreatment of pyrolysis bio-oil: A review. *Fuel Processing Technology*. 2019. Vol. 195. Art. 106140. DOI:10.1016/j.fuproc.2019.106140.
13. Soria M. A., Barros D., Madeira L. M. Hydrogen production through steam reforming of bio-oils derived from biomass pyrolysis: Thermodynamic analysis including in situ CO₂ and/or H₂ separation. *Fuel*. 2019. Vol. 244. P. 184–195. DOI:10.1016/j.fuel.2019.01.156.

Ilyashenko Yu.V., Efymenko V.V. ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE USE OF VEGETABLE MOTOR OILS TAKING INTO ACCOUNT CHANGES IN THEIR QUALITY

The article considers the environmental aspects of the use of vegetable motor oils, taking into account changes in their quality indicators during operation. The main physicochemical properties of vegetable oils that affect their environmental friendliness are analyzed. A comparative analysis of changes in the quality of vegetable motor oils compared to mineral and synthetic analogues from an environmental point of view is carried out. Motor oils directly affect the ecological state of the environment at all stages of production, operation and disposal. The main environmentally significant characteristics of motor oils are the origin of raw materials, biodegradability, toxicity of degradation products, as well as the degree of environmental risk in the event of leaks or improper handling of waste materials. Traditional motor oils made from petroleum products are characterized by low biodegradability and long-term negative impact on soils and water bodies. During operation, they undergo oxidative and thermal degradation, which is accompanied by the formation of toxic compounds that complicate their further disposal. Vegetable oils are a promising alternative to traditional petroleum lubricants, these oils have significant potential for use in various fields of technology. They are produced from renewable raw materials, have high biodegradability and low toxicity, which significantly reduces the environmental load in the event of leaks or release into the environment. Vegetable motor oils are characterized by a number of physicochemical properties that directly affect their operational and environmental characteristics. It has been shown that the use of vegetable oils, provided that their composition is optimized and operational characteristics are controlled, contributes to reducing the negative impact on the environment and increasing the environmental safety of vehicles. Further development of oil modification technologies and optimization of the composition of biolubricants will contribute to expanding the scope of their application, reducing the negative impact on the environment, and increasing the level of environmental safety of engines and mechanisms.

Keywords: vegetable motor oils, environmental safety, quality indicators, oil degradation, biodegradability, oxidative stability, operational properties, environmental impact.

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 543:615

DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/18>**Косогін О.В.**<https://orcid.org/0000-0001-8379-9580>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кушмирук А.І.<https://orcid.org/0000-0002-8167-6277>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лінючева О.В.<https://orcid.org/0000-0003-4181-5946>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕЛЕКТРОТИТРАЦІЙНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ СПОЛУК ГІДРАЗИНУ

Широке використання гідрозину в хімічній промисловості для синтезу різноманітних органічних сполук, застосування його як протикорозійного агента на електростанціях, поширення як компонента авіаційного та ракетного палива створює небезпечну можливість для його потрапляння в навколишнє середовище. Гідрозин відноситься до високо токсичних канцерогенних сполук, тому усі місця його використання чи отримання мають бути обладнані засобами моніторингу. Визначення вмісту гідрозину можливе із використання різних методів, однак для безперервного застосування в польових умовах метод має бути простим, надійним, достатньо дешевим та не вимагати високої кваліфікації обслуговуючого персоналу. Таким вимогам цілком задовольняють електрохімічні методи, зокрема, кулонометричний електротитраційний метод, де в аналізованій пробі проводиться контрольований синтез титранту, який кількісно взаємодіє із визначуваною сполукою, а вміст визначуваної речовини встановлюють по кількості електрики, витраченої на синтез титранту. Відомі системи використовують виключно платинові електроди, що робить їх дуже дорогими, а самі електроди з часом деградують внаслідок отруєння домішками.

Проведено порівняння платини та титану, активованого платиною або діоксидом рутенію, з метою встановлення можливості використання їх як електродів сенсорної та генераційної систем електротитраційної установки для визначення гідрозину. Показано, що діоксидно-рутенієвий електрод на титановій основі характеризується меншою перенапругою в реакції утворення броду як титранту, порівняно із платиновими матеріалами, та більшою високою хімічною стійкістю за умов синтезу галогену. Встановлено, що в діапазоні потенціалів утворення титранту на діоксидно-рутенієвих електродах на титановій основі не відбувається електрохімічне перетворення сполук гідрозину, що дозволить забезпечити однозначне трактування результатів визначення кількості гідрозину лише по кількості електроенергії, витраченої на синтез титранту (броду).

Експериментально показано, що можливе електротитраційне визначення сполук гідрозину із використанням діоксидно-рутенієвих електродів на титановій основі як елемента генеруючої системи для синтезу титранту (броду) та елементів сенсорної системи, яка дозволяє встановити момент кінця титрування по виникненню струму відновлення броду після повного окиснення гідрозину.

Ключові слова: гідрозин; брод; електротитраційний метод; платинований титан; діоксид рутенію.

Постановка проблеми. Серед небезпечних хімічних сполук, які здатні потрапляти у природні середовища, особливу увагу привертає гідразин – речовина, що широко використовується в різних галузях промисловості. Його застосовують як засіб запобігання корозії в системах охолодження електростанцій, у промисловості для синтезу різноманітних речовин та на виробничих об'єктах [1]. Водночас гідразин характеризується високою токсичністю (гранично допустима концентрація в повітрі робочої зони складає $0,1 \text{ мг/м}^3$), а його наявність навіть у малих кількостях може становити загрозу для здоров'я людини. Потрапляння гідразину в навколишнє середовище можливе як унаслідок промислових викидів, так і під час проведення хімічних технологічних процесів, що зумовлює необхідність постійного контролю його вмісту в повітрі та воді. Однак наявні методи та вимірювальні прилади часто не забезпечують достатньої точності, що ускладнює достовірну оцінку концентрації цієї речовини. У зв'язку з цим актуальним є створення більш точних і надійних способів визначення гідразину.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кількісне визначення гідразину можливе з використанням різних методів. Спектрофотометричний аналіз вирізняється простотою реалізації, доступністю та порівняно низькою вартістю обладнання. Метод ґрунтується на взаємодії гідразину зі спеціальними реагентами з утворенням забарвлених комплексів, оптична густина яких прямо залежить від вмісту аналіту в пробі [2]. До основних переваг спектрофотометрії належать висока чутливість, легкість виконання та можливість швидкого аналізу значної кількості зразків. Водночас метод може зазнавати впливу сторонніх компонентів розчину, а також потребує суворого контролю умов проведення реакції.

Для аналізу гідразину у складних об'єктах широко використовують високоефективну рідинну та газову хроматографію, які забезпечують ефективне розділення компонентів суміші на хроматографічній колонці з подальшим детектуванням гідразину за допомогою мас-спектрометричних, флуориметричних або електрохімічних детекторів [3]. Основними перевагами хроматографії є висока точність, відтворюваність та можливість автоматизації аналітичного процесу. Разом з тим, суттєвими недоліками залишаються висока вартість апаратури, складність пробопідготовки та потреба у висококваліфікованому персоналі.

Флуориметричні методи базуються на утворенні флуоресцентних сполук у результаті вза-

ємодії гідразину зі спеціальними реагентами (наприклад, кумарин, ціані, родамін, флуоресцеїн), при цьому інтенсивність випромінювання пропорційна концентрації аналіту. Основними перевагами флуориметрії є надзвичайно висока чутливість і низький рівень фонового сигналу, що дозволяє проводити аналіз за дуже малих концентрацій. Водночас метод потребує дорогого обладнання, спеціальних реагентів і є чутливим до змін умов навколишнього середовища [4].

Значну увагу останнім часом приділяють електрохімічним методам аналізу, таким як амперометрії, потенціометрії та імпедансометрії. Визначення гідразину у цих методах базується на реєстрації змін електрохімічних параметрів під час його електродного окиснення або відновлення. Електрохімічні сенсори виготовляють на основі різних матеріалів – золота [5], паладію [6], різних вуглецевих матеріалів [7, 8], і вони характеризуються високою електрокаталітичною активністю щодо гідразину, що забезпечує ефективність його детектування. До переваг електрохімічних підходів належать висока чутливість, швидкість аналізу та можливість здійснення безперервного або польового моніторингу. Недоліками є вплив домішок, необхідність регулярного калібрування та обмежений термін стабільної роботи сенсорів, що пов'язано як з поступовою деградацією електродного матеріалу, так і зі складністю забезпечення стабільних умов роботи сенсора за тривалою експлуатації, оскільки окиснення гідразину призводить до значного підкислення розчину електроліту



Одним з електрохімічних методів є також кулонометричне титрування, в якому гідразин взаємодіє з титрантом, що генерується безпосередньо в електрохімічній комірці шляхом пропускання електричного струму. Момент завершення реакції взаємодії гідразину з титрантом при цьому фіксується потенціо- або амперометричним методом [9]. Такий підхід усуває проблеми, пов'язані з приготуванням і зберіганням титрантів, та забезпечує виняткову точність і відтворюваність результатів. З літератури відомі розроблені методи, де такими титрантами виступають галогени (Cl_2 , Br_2 , I_2), іони Fe^{3+} або Ce^{4+} [10], а фіксація появи в розчині вільного титранту проводиться потенціостатичним методом з використанням платинових електродів. Генерування титранту також проводиться на платинових електродах [11], що робить метод достатньо дорогим у виконанні.

Таким чином, широке застосування гідразину та його висока токсичність потребують реалізації ефективної системи моніторингу, що можна забезпечити з використанням електрохімічних методів аналізу, таких як кулонометричне титрування. Проте з метою здешевлення методу доцільним є проведення пошуку більш дешевих електродних матеріалів, придатних до селективного генерування титранту за наявності в розчині сполук гідразину.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження електрохімічних властивостей електродних матеріалів придатних для використання в кулонометричному електротитраційному методі визначення гідразину.

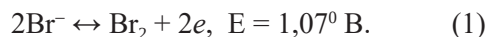
Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- дослідити електрохімічні характеристики різних матеріалів, стійких в робочому розчині;
- встановити можливість використання запропонованих матеріалів для використання за одночасної наявності в розчині сполук гідразину та титранту;
- визначити можливість використання запропонованих матеріалів для застосування їх в електротитраційній системі для визначення гідразину.

Виклад основного матеріалу. Дослідження електрохімічної поведінки електродних матеріалів проводили з використанням класичної триелектродної схеми з лінійною розгорткою потенціалу 1 мВ/с. Робочий електрод масою 0,1 г виготовляли пресуванням порошкоподібного титану марки ПТЕМ (питома поверхня 0,1 м²/г), на який термічним розкладанням солей наносили каталітично активні покриття RuO₂ (вміст 50 мг/г Ti) або платину (вміст 20 мг/г Ti). Ефективна площа такого пористого електрода складала 100 см². Крім таких RuO₂/Ti та Pt/Ti електродів для порівняння досліджували також поведінку чистої платини, використовуючи дрітчастий електрод площею 6 мм². Допоміжний електрод був виготовлений з платинової фольги площею 8 см². В роботі використовували ртутно-сульфатний електрод порівняння, а усі значення потенціалів потім переводили в стандартну водневу шкалу. Дослідження проводили в розчині сульфатної кислоти з концентрацією 0,1 моль/дм³ H₂SO₄. В роботі використовували потенціостат PGStat500n з підключенням його до персонального комп'ютера.

В першій серії дослідів необхідно було встановити придатність досліджуваних електродів для використання як анодного матеріалу для генерації титранту, тобто Br₂, для чого досліджували результати анодної поляризації 0,1 моль/дм³ H₂SO₄ + 10 г/дм³ KBr.

На поверхні платини в даному розчині (рис. 1, а) встановлюється беструмний потенціал приблизно +0,6 В, що відповідає перебігу спряжений процесів іонізації розчиненого кисню та формуванню дофазових оксидів на поверхні платини [12]. Анодна поляризація призводить до появи хвилі анодного струму, що пов'язано з досягненням потенціалів утворення бромиду



За подальшої поляризації анодні струми зростають, що може свідчити про досягнення потенціалів виділення кисню



та утворенням інших окиснених форм бромиду

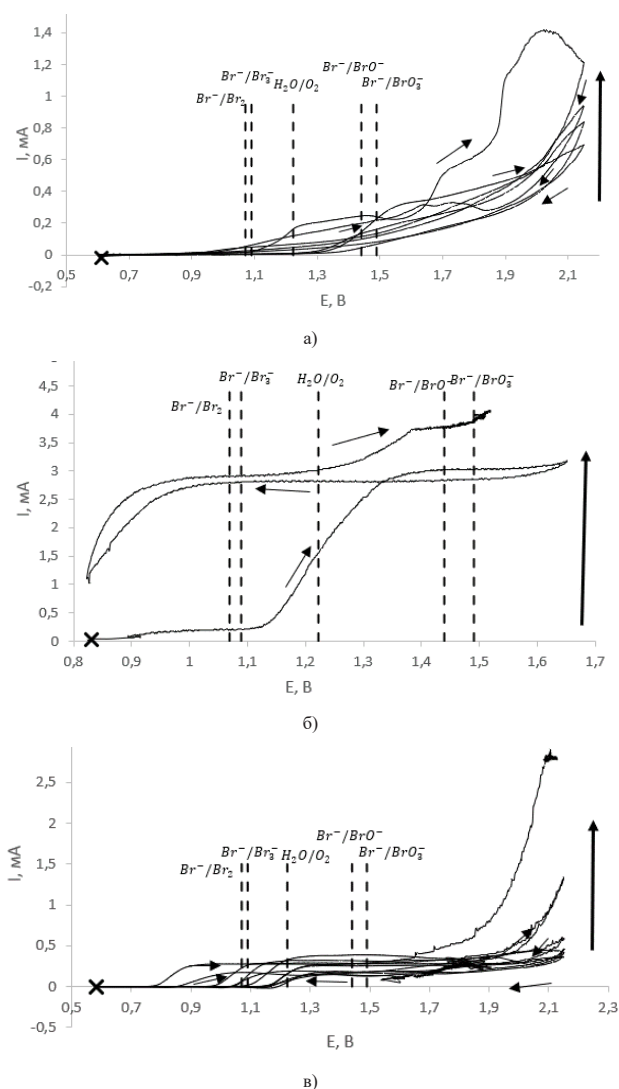
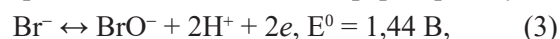


Рис. 1. Анодні циклічні вольтамперні криві в розчині 0,1 моль/дм³ H₂SO₄ + 10 г/дм³ KBr на електродах: а) платина; б) Pt/Ti; в) RuO₂/Ti. Зсув кривих при циклуванні показано стрілками



За багаторазового циклування помітним є зсув потенціалів появи струму в більш негативний бік та зростанням самих струмів, що може свідчити про накопичення в розчині продуктів окиснення броміду за реакціями (1), (3), (4).

Поведінка титанового електрода, активованого платиною, на першому циклі поляризації схожа на поведінка платинових електродів (рис. 1, б) – за потенціалів позитивніше 1,1 В спостерігаються струми, пов'язані із перебігом реакції (1), та подальше зростання струмів за потенціалів позитивніше 1,5 В, однак на зворотному ході поляризаційної кривої спостерігаються значні струми, що може бути пов'язано із затримкою в порах електрода продуктів окиснення бромід-іонів. На другому циклі поляризаційної кривої значні струми спостерігаються за значно негативніших потенціалів – близько +0,8 В – і зростають із зсувом потенціалу в позитивний бік. Також варто відзначити, що Pt/Ti-електроди характеризувались низькою відтворюваністю і в деяких випадках не вдавалось отримати більше, ніж 2-3 цикли поляризації. Це може бути пов'язано із значним агресивним впливом окиснених форм броміду на високодисперсну платину та її руйнуванням в глибині пор [13].

На RuO₂/Ti-електродах струми утворення броміду спостерігались за менш позитивних потенціалів (рис. 1, в), а виділення кисню – за значно позитивніших потенціалів порівняно із платиною та Pt/Ti-електродом, що пов'язано із більшою селективністю оксидів рутенію до реакції окиснення галогенід-іонів, ніж утворення кисню [14].

Отримані результати свідчать, що як анодний матеріал для окиснення бромід-іонів як можливого титранту сполук гідрозину більш привабливими є RuO₂/Ti-електроди, які характеризуються вищою селективністю до цільової реакції та мають меншу вартість порівняно із платиновими матеріалами.

В другій серії дослідів досліджували поведінку електродних матеріалів в фоновому розчині 0,1 моль/дм³ сульфатної кислоти за наявності сполук гідрозину, який вводили в розчин у вигляді розчину гідрозин-хлориду для досягнення його концентрації 5·10⁻⁵ моль/дм³. На усіх досліджених електродних матеріалах в даному розчині встановлювався беструмний потенціал +0,65 В...+0,8 В, пов'язаний з іонізацією розчиненого кисню та формуванням поверхневих оксидних форм. Анодна поляризація платинових та RuO₂/Ti-електродів призводила до появи лише незначних струмів до потенціалів +1,4 В (рис. 2, а, в), і лише за більш

позитивних значень потенціалів спостерігалось зростання струму, пов'язаного із початком виділення кисню. На зворотному ході поляризаційні криві були майже дзеркальні до прямого ходу, що свідчить про високу стабільність даних матеріалів та відсутність електрохімічних перетворень сполук гідрозину на поверхні електродів.

На Pt/Ti-електроді встановлювалось менш позитивне значення беструмного потенціалу (рис. 2, б), а поляризація призводила до появи дуже малих струмів, при цьому самі криві були несиметричними для прямого та зворотного ходу поляризації, що свідчить про можливий перебіг необоротних процесів, можливо пов'язаних із дефектністю шару платини на поверхні титану та повільними процесами корозії титанової основи.

Відповідно до отриманих результатів, найбільш доцільним як електродного матеріалу системи детектування броміду як титранту за одночасної наявності в системі сполук гідрозину є використання RuO₂/Ti-електродів, які характеризуються високою селективністю, стабільністю в кислотному середовищі та є більш дешевими у порівнянні з платиновими матеріалами. Таким чином, RuO₂/Ti може бути використаний і як анодний матеріал системи генерування броміду, та і як електродний матеріал для системи детектування броміду, тому що поляризація RuO₂/Ti-електрода на 0,3 В позитивніше від рівноважного потенціалу дозволяє зафіксувати струми окиснення броміду, а за його відсутності (коли в системі наявний гідрозин) – не призводить до перебігу помітних струмів.

Установка для електротитраційного визначення (рис. 3) сполук гідрозину містить в своєму складі ємність 1, в яку заливають робочий розчин 5 (розчин 0,1 моль/дм³ H₂SO₄ + 10 г/дм³ KBr). Через верхні труби в ємність 1 введено трубку 2 для подачі розчину гідрозину, електроди сенсорної та генераційної систем. Система генерації являє собою анод 10, виготовлений з титанової дробинки, активованої оксидом рутенію, та нікелевий катод 11, під'єднані до джерела постійного струму 12. Катод 11 розміщено всередині скляної трубки 8, в нижній частині якої розташовано дрібнопориста скляна перегородка 9, яка ускладнює потрапляння компонентів розчину 5 всередину трубки 8, і за рахунок якої рівень розчину в трубці 8 підтримується вище, ніж в ємності 1. Сенсорна система складається із робочого електрода 14 та допоміжного електрода 13, які під'єднані до зовнішнього потенціостатуючого пристрою 15 за двохелектродною схемою.

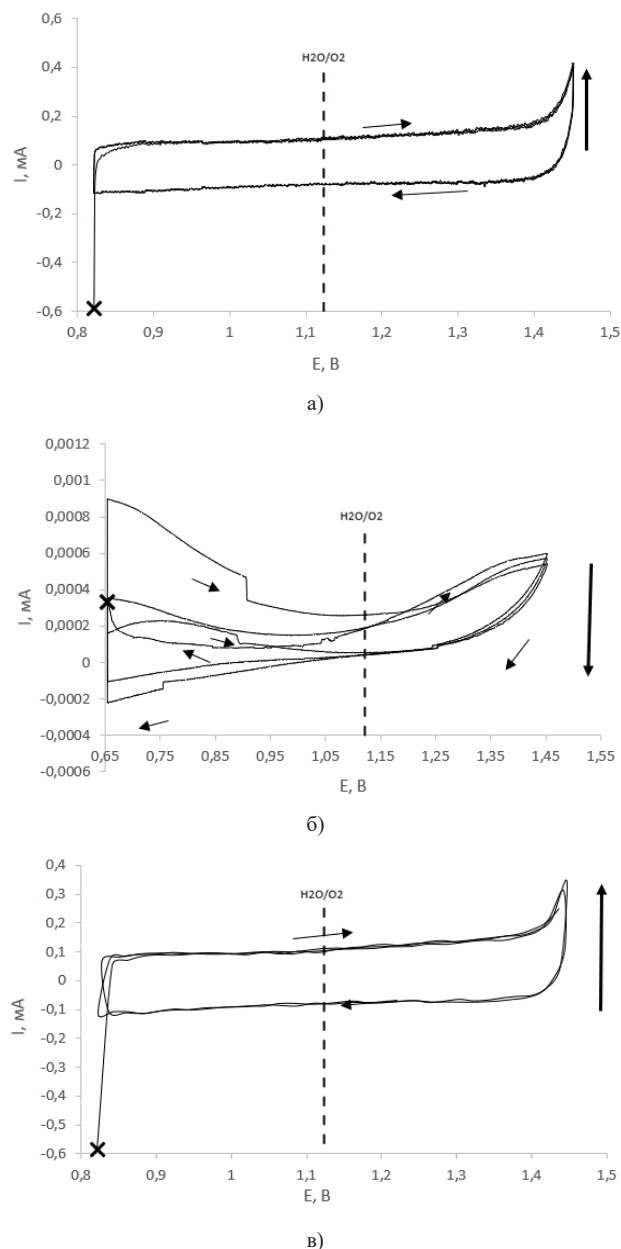


Рис. 2. Анодні циклічні вольтамперні криві в розчині 0,1 моль/дм³ H₂SO₄ + 5·10⁻⁵ моль/дм³ N₂H₄·HCl на електродах: а) платина; б) Pt/Ti; в) RuO₂/Ti

Введення в систему розчину гідразину проводять через трубку 3, оснащену запірним краном 4. Комірка обладнана клапаном 16 для відведення в навколишнє середовище газоподібних продуктів електродних реакцій (водень). Перемішування розчину 5 для підвищення швидкості взаємодії сполук гідразину з титрантом (бромом) здійснюється якорем 6 магнітної мішалки 7.

Дослідження із встановлення можливості використання електротитраційної установки для визначення кількості (маси) введенного гідразину проводили за наступною процедурою.

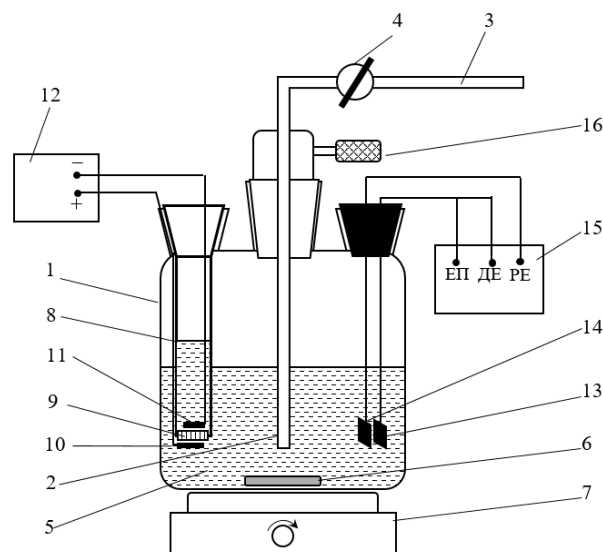
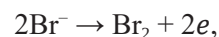


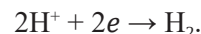
Рис. 3. Схема електротитраційної комірки для визначення сполук гідразину

1 – ємність; 2 – трубка введення гідразину в розчин; 3 – трубка подачі розчину гідразину; 4 – запірний кран; 5 – робочий розчин; 6 – магнітний якор; 7 – магнітна мішалка; 8 – скляна трубка – корпус генераційної системи; 9 – скляна пориста перегородка; 10 – анод генераційної системи; 11 – катод генераційної системи; 12 – джерело постійного струму; 13 – робочий електрод сенсорної системи; 14 – допоміжний електрод сенсорної системи; 15 – потенціостат; 16 – клапан

Через електроди генераційної системи джерелом постійного струму 12 пропускають струм величиною $I = 1,5$ мА, під дією якого на аноді 10 відбувається процес генерування бром

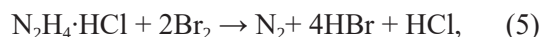


а на катоді 11 – виділення водню



Між електродами 13 і 14 сенсорної системи (обидва виготовлені з RuO₂/Ti) потенціостатом PGStat500n підтримують напругу 300 мВ і реєструють струм, що перебігає між електродами. В тому випадку, якщо в розчині залишається генерований на аноді 10 бром, це призводить до появи на робочому електроді 14 струму його відновлення.

В тому випадку, якщо в розчин потрапляють сполуки гідразину, то вони одразу вступають в хімічну реакцію з бромом:



і якщо кількість введенного в розчин гідразину більше, ніж відповідає стехіометричній реакції взаємодії (5), то це призводить до зникнення

струму відновлення бром у між електродами сенсорної системи. Після того, як буде згенеровано кількість бром у, що еквівалентна кількості абсорбованого гідрозину, в розчині 5 з'являється вільний бром Br_2 , що призводить до появи струму його окиснення на електроді 14 сенсорної системи. Фіксують час τ , впродовж якого через генераторну систему пропускали струм, і за кількістю витраченої електрики розраховують масу утвореного бром у, а відповідно – кількість введенного в систему гідрозину.

Проведений експеримент повторили кілька разів для встановлення його відтворюваності (рис. 4).

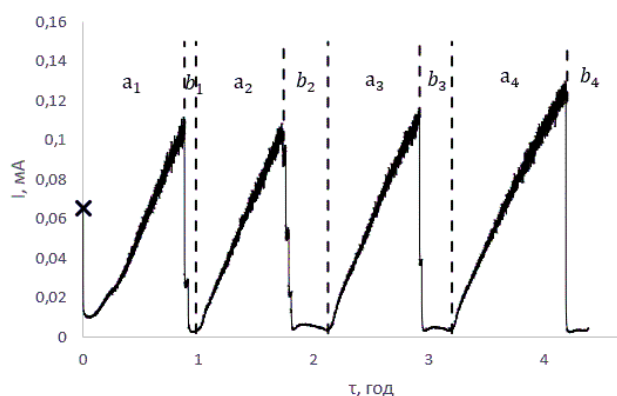


Рис. 4. Крива зміни струму на сенсорній системі електротитраційної установки. Ділянки (а) – фіксація струму, пов'язаного із відновленням сполук електрогенерованого бром у; ділянки (б) – зникнення струму в результаті введення в систему гідрозину

За результатами експерименту розраховано такі величини:

– маса бром у, генерована в період a_i , (до введення в розчин сполук гідрозину), г:

$$m_a = k \cdot I \cdot \tau_a = \frac{M}{z \cdot F} \cdot I \cdot \tau_a,$$

де k – електрохімічний еквівалент бром у, г/(А·год); M – молярна маса бром у, 160 г/моль; z – кількість електронів в реакції електрогенерування бром у; F – стала Фарадея, 26,8 А·год/моль; τ_a – тривалість періоду a_i , год;

– маса бром у, генерована в період b_i тривалістю τ_b (після введення в розчин певної кількості спо-

лук гідрозину m_{np} , г, до моменту появи в системі вільного бром у), г:

$$m_b = k \cdot I \cdot \tau_b.$$

– маса гідрозину, яка відповідає кількості генерованого бром у, за реакцією (5)

$$m_r = (m_a + m_b) \cdot \frac{M_r}{2M(\text{Br}_2)},$$

де M_r – молярна маса сполуки гідрозину, 68,5 г/моль; $M(\text{Br}_2)$ – молярна маса бром у, 160 г/моль.

За експериментальними даними (табл. 1) розраховано значення виходу за струмом процесу визначення гідрозину, %

$$Bc = \frac{m_{np}}{m_r} \cdot 100.$$

Отримані дані продемонстрували високу ефективність визначення сполук гідрозину електротитраційним методом. Враховуючи, що взаємодія бром у з гідрозином відбувається повністю, то розраховане значення виходу за струмом відносяться до процесу електрогенерування бром у, що потребує подальшого вдосконалення даного методу в частині встановлення оптимальних умов проведення електролізу (густина струму, конструкція генеруючого електрода) та оптимізації будови комірки для забезпечення рівномірного перемішування, що планується реалізувати в подальших дослідженнях.

Дослідження виконані в рамках конкурсу НФДУ «Наука для зміцнення обороноздатності України», тема «Інноваційні методики та засоби швидкого визначення забруднюючих речовин на основі сполук гідрозину, що потрапляють в навколишнє середовище внаслідок воєнних дій та аварійного розливу ракетних/авіаційних палив», №2023.04/0069 (номер державної реєстрації 0124U004754).

Висновки

1. Встановлено, що селективне електрогенерування бром у можливе з використанням електродів, виконаних із титану, активованого діоксидом рутенію, на якому цільовий процес перебігає зі значно меншою перенапругою, ніж на платинових матеріалах.

Таблиця 1

Результати експерименту з електротитраційного визначення сполук гідрозину

№ досліду	Маса генерованого бром у m_a , г	Маса введенного в систему гідрозину m_{np} , г	Маса генерованого бром у m_b , г	Розрахункова маса гідрозину m_r , г	Вихід за струмом, %
1	0,0035	0,000754	0,00052	0,00086	87,5
2	0,00358	0,000754	0,00164	0,00112	67,5
3	0,00406	0,000891	0,00134	0,00115	77,1
4	0,00406	0,000891	0,00164	0,00122	73,0

2. Встановлено, що на діоксидно-рутенієвих електродах на титановій основі не відбувається окиснення гідразину до потенціалів +1,4 В, що дозволяє їх використовувати для електрогенерування бром за наявності в розчині сполук гідразину.

3. Показано можливість створення електротитраційної установки для визначення вмісту сполук гідразину, в якій анод генераційної системи та обидва електроди сенсорної системи виконані із титану, активованого діоксидом рутенію.

Список літератури:

1. Schirmann J., Bourdauducq P. Hydrazine. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley. Online Library. 2001. https://doi.org/10.1002/14356007.a13_177
2. George M. Spectrophotometric determination of hydrazine. *Talanta*. 2008. Vol. 75. № 1. P. 27–31. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.09.002>
3. Takemine S., Motegi M., Takayanagi M., Usui S., Kuroda, I. Determination of hydrazine in air by liquid chromatography/tandem mass spectrometry combined with precolumn derivatization. *Talanta*. 2023. Vol. 258. Article № 124411. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124411>
4. Zhang X.-Y., Yang Y.-S., Wang W., Jiao Q.-C., Zhu H.-L. Fluorescent sensors for the detection of hydrazine in environmental and biological systems: Recent Advances and Future Prospects. *Coordination Chemistry Reviews*. 2020. Vol. 417. Article № 213367. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213367>
5. Tang Y.-Y., Kao C.-L., Chen P.-Y. Electrochemical detection of hydrazine using a highly sensitive nanoporous gold electrode. *Analytica Chimica Acta*. 2012. Vol. 711. P. 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.11.002>
6. Zhang H., Huang J., Hou H., You, T. Electrochemical detection of hydrazine based on Electrospun Palladium nanoparticle/carbon nanofibers. *Electroanalysis*. 2009. Vol. 21. № 16. P. 1869–1874. <https://doi.org/10.1002/elan.200904630>
7. Lauko L., Hudec R., Lenghartova K., Manova A., Cacho F., Beinrohr E. Simple electrochemical determination of hydrazine in water. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2015. Vol. 24. P. 1659–1666. <https://doi.org/10.15244/pjoes/40935>
8. Mohammed H. Y., Farea M. A., Ingle N. N., Sayyad P. W., Al-Gahouari T., Mahadik M. M., Bodkhe G. A., Shirsat S. M., Shirsat M. D. Review—electrochemical hydrazine sensors based on graphene supported metal/metal oxide nanomaterials. *Journal of The Electrochemical Society*. 2021. Vol. 168. № 10. Article № 106509. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac2ddc>
9. Gilbert E. C. The electrometric titration of hydrazine and its salts. *Journal of the American Chemical Society*. 1924. Vol. 46. №12. P. 2648–2655. <https://doi.org/10.1021/ja01677a006>
10. Sahoo P., Malathi N., Ananthanarayanan R., Praveen K., Murali N. A novel approach for high precision rapid potentiometric titrations: Application to Hydrazine Assay. *Review of Scientific Instruments*. 2011. Vol. 82. №11. Article № 114102 <https://doi.org/10.1063/1.3660807>
11. He Z. K., Fuhrmann, B., Spohn U. Coulometric microflow titrations with chemiluminescent and amperometric equivalence point detection. *Analytica Chimica Acta*. 2000. Vol. 409. №1–2. P. 83–91. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(99\)00890-9](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00890-9)
12. Kushmyruk A. I., Kosohin O. V., Linyucheva O. V., Reveko V. A., Miroshnychenko Yu. S. Electrochemical behavior of porous titanium electrodes in phosphoric acid. *Materials Science*. 2015. Vol. 51. №3. P. 429–435. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9859-z>
13. Nurdillayeva R. N., Bayeshov A. B., Khabibullayeva Sh. H. Study of on the electrochemical behavior of titanium in acidic bromide solution by recording the potentiodynamic polarization curves. *Series chemistry and technology*. 2019. Vol. 5. №437. P. 46–53. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1491.52>
14. Deng Z., Xu S., Liu C., Zhang X., Li M., Zhao Z. Stability of dimensionally stable anode for chlorine evolution reaction. *Nano Research*. 2023. Vol. 17. №3. P. 949–959. <https://doi.org/10.1007/s12274-023-5965-7>

Kosohin O.V., Kushmyruk A.I., Linyucheva O. V. ELECTROTITRATION METHOD FOR DETERMINING THE CONTENT OF HYDRAZINE COMPOUNDS

The widespread use of hydrazine in the chemical industry for the synthesis of various organic compounds, its use as an anti-corrosion agent at power plants, and its distribution as a component of aviation and rocket fuel create a dangerous possibility for its release into the environment. Hydrazine is a highly toxic carcinogenic compound, therefore all places of its use or receipt must be equipped with monitoring devices. The determination of hydrazine content is possible using various methods, however, for continuous use in field conditions, the method must be simple, reliable, sufficiently cheap and not require high qualifications of service personnel. These requirements are fully met by electrochemical methods, in particular, the coulometric electrotitration method, where the controlled synthesis of a titrant is carried out in the analyzed sample, which quantitatively interacts with the determined compound, and the content of the determined substance is

determined by the amount of electricity spent on the synthesis of the titrant. Known systems use exclusively platinum electrodes, which makes them very expensive, and the electrodes themselves degrade over time due to poisoning by impurities. A comparison of platinum and titanium activated by platinum or ruthenium dioxide was carried out in order to establish the possibility of using them as electrodes of the sensor and generation systems of an electrotitration unit for the determination of hydrazine. It was shown that the ruthenium dioxide electrode on a titanium basis is characterized by a lower overvoltage in the reaction of bromine formation as a titrant, compared to platinum materials, and higher chemical stability under the conditions of halogen synthesis. It was established that in the range of titrant formation potentials on ruthenium dioxide electrodes on a titanium base, no electrochemical transformation of hydrazine compounds occurs, which will allow for an unambiguous interpretation of the results of determining the amount of hydrazine only by the amount of electricity spent on the synthesis of the titrant (bromine).

It has been experimentally shown that electrotitration determination of hydrazine compounds is possible using ruthenium dioxide electrodes on a titanium base as an element of the generating system for the synthesis of the titrant (bromine) and elements of the sensor system, which allows determining the moment of the end of the titration by the occurrence of a bromine reduction current after complete oxidation of hydrazine.

Keywords: hydrazine; bromine; electrotitration method; platinized titanium; ruthenium dioxide.

Дата першого надходження статті до видання: 06.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 665.7.032.5 + 676.275
DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/19>

Кусняк І.І.

<https://orcid.org/0000-0003-3980-3110>
Національний лісотехнічний університет України

Бехта П.А.

<https://orcid.org/0000-0002-4320-5247>
Національний лісотехнічний університет України

Козак Р.О.

<https://orcid.org/0000-0003-1297-9810>
Національний лісотехнічний університет України

Копанський М.М.

<https://orcid.org/0000-0002-3897-4818>
Національний лісотехнічний університет України

Ортинська Г.Є.

<https://orcid.org/0000-0002-9365-1667>
Національний лісотехнічний університет України

Бринь О.І.

<https://orcid.org/0000-0002-9324-8093>
Національний лісотехнічний університет України

Салабай Р.Г.

<https://orcid.org/0009-0001-9820-652X>
Національний лісотехнічний університет України

Тимик Д.В.

<https://orcid.org/0009-0004-4524-0689>
Національний лісотехнічний університет України

Кряжок С.А.

<https://orcid.org/0009-0006-5806-2599>
ПАТ «Жидачівський целюлозно-паперовий комбінат»

ВПЛИВ ВИДУ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ МОДИФІКОВАНОГО КРОХМАЛЮ НА ВЛАСТИВОСТІ КАРТОНУ-ЛАЙНЕРА

Виробництво картону-лайнера є перспективним напрямом целюлозно-паперової галузі завдяки можливості багаторазової переробки волокнистої сировини та екологічності пакувальних матеріалів. Водночас використання макулатурної волокнистої сировини веде до зниження міцнісних характеристик картону, що потребує пошуку ефективних способів їх підвищення. Одним із перспективних технологічних рішень є застосування модифікованих крохмалів як зміцнювальних добавок.

У цій роботі досліджено вплив виду та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю на фізико-механічні властивості картону-лайнера, виготовленого з макулатурної волокнистої маси марки МС-5Б. Для порівняння результатів дослідження виготовляли контрольні зразки картону з додаванням нативного (натурального) крохмалю, а також зразки без внесення крохмальних добавок. Волокнисту суспензію готували у лабораторному гідропульпері об'ємом 20 л за концентрації 3%, після

чого масу згущували на ситі з розміром отворів 0,25 мм. Перед формуванням зразків вологість волокнистої маси становила 60–62%. Дослідні зразки картону формували у два шари (лицевий і зворотний) для відтворення структури промислового картону-лайнера, використовуючи волокнисту масу марки МС-5Б із введенням відповідних видів модифікованого крохмалю: катіонного, окисненого та ацетилюваного у концентраціях 1 та 2%. Виготовлення картону здійснювали в промислових умовах на папероробній машині № 3 відповідно до прийнятої технологічної схеми виробництва. Для отриманих зразків визначали масу за площею, абсолютний опір продавлюванню та руйнівне зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку відповідно до вимог чинних стандартів.

Результати досліджень показали, що застосування модифікованих кукурудзяних крохмалів сприяє підвищенню основних показників міцності картону-лайнера. Найбільший ефект зміцнення забезпечує катіонний крохмаль, що пояснюється його електростатичною взаємодією з негативно зарядженими поверхнями целюлозних волокон. Окиснений та ацетилюваний крохмаль також позитивно впливають на структуру волоконної сітки, покращуючи адгезійні властивості та рівномірність формування листа. Встановлено, що збільшення концентрації крохмалю від 1 до 2% сприяє зростанню маси картону, абсолютного опору продавлюванню та руйнівного зусилля під час стискання кільця. Отримані результати підтверджують доцільність використання модифікованого катіонного кукурудзяного крохмалю концентрацією 2% для підвищення міцності картону-лайнера та ефективності використання вторинної волокнистої сировини і відповідність вимогам ДСТУ для пакувального лайнера середнього класу міцності, що збільшуватиме ресурсну ефективність виробництва.

Ключові слова: картон-лайнер, модифікований крохмаль, катіонний крохмаль, окиснений крохмаль, ацетилюваний крохмаль, фізико-механічні властивості.

Постановка проблеми. З огляду на світові тенденції розвитку ринку паперово-картонної продукції, обсяги виробництва пакувального паперу і картону зростають [1, 2]. Особливо посилено розвивається сегмент пакувальних матеріалів, виготовлених із вторинної волокнистої сировини, зокрема картону-лайнера (рис. 1).

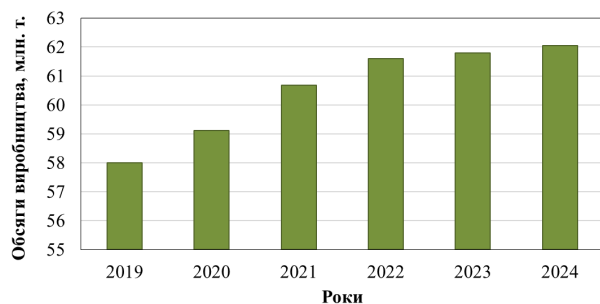


Рис. 1. Світовий ринок виробництва картону-лайнера [2]

Збільшення попиту на картон-лайнер у світовому масштабі пов'язане із можливістю його багаторазової переробки та екологічністю [3]. Активне зростання споживання гофрокартонної тари розпочалося з 2025 року з набранням чинності Регламенту Європейського Союзу щодо пакування та відходів пакування (PPWR) [4]. Він вимагає, щоб все пакування було придатним для переробки до 2030 року, встановлюючи мінімальні цільові показники вмісту переробленої сировини та комплексні вимоги щодо повторного використання. Такі ж процеси розвитку характерні для українського ринку картонно-паперової

продукції. Виробництво картону-лайнера в Україні належить до стратегічно важливих сегментів целюлозно-паперової галузі. Підприємства функціонують переважно на базі вторинної волокнистої сировини, що відповідає сучасним світовим тенденціям розвитку циркулярної економіки та замкнених виробничих циклів. Більшість виробників здійснили модернізацію технологічного обладнання, впровадивши високопродуктивні папероробні машини з автоматизованими системами керування, що дозволяє підвищити стабільність якості продукції та знизити питомі витрати ресурсів. Разом із тим у наукових дослідженнях і галузевих оглядах наголошується на низці проблем, характерних для українського ринку картону-лайнера [5, 6]. Серед них – дефіцит якісної макулатурної сировини, її сезонні коливання та висока енергомісткість виробничих процесів. Частина вторинної сировини експортується, тоді як імпортована макулатура має підвищену вартість через логістичні витрати, що негативно впливає на собівартість продукції. У зв'язку з цим особлива увага приділяється покращенню рецептур волокнистих мас і підвищенню ефективності використання наявної сировини.

Перспективним напрямом, що активно висвітлюється в наукових публікаціях, є застосування модифікованих природних полімерів, зокрема кукурудзяного крохмалю, для підвищення міцності картону-лайнера без істотного збільшення витрат волокнистої складової. Такий підхід дозволяє частково компенсувати зниження якості вторинних волокон, забезпечити необхідні показники опору

продавлюванню та стисканню, а також підвищити конкурентоспроможність української продукції на внутрішньому й зовнішньому ринках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз сучасних наукових джерел свідчить, що одним із найбільш ефективних напрямів підвищення міцності картону-лайнера є використання модифікованих крохмалів різної хімічної природи [7–16]. Дослідження підтверджують, що застосування нативного крохмалю як зміцнювального агента обмежується його високою в'язкістю, схильністю до кристалізації та нестабільністю властивостей у процесі зберігання і використання. У зв'язку з цим у промисловій практиці переважають модифіковані форми крохмалю, отримані шляхом хімічної, фізичної або ферментативної обробки [7, 10].

У працях українських авторів розглядаються різні способи модифікування крохмалю, зокрема окиснення гідроген пероксидом у присутності FeSO_4 [13]. Даний спосіб модифікування застосовувався для кукурудзяного крохмалю, який веде до зниження його молекулярної маси та утворення карбоксильних і карбонільних груп, що покращує розчинність та стабільність дисперсії. Авторами статті [14] наведено результати модифікування кукурудзяного крохмалю епоксипропілтриетаноламоній хлоридом, гексаметилолмеламіном та гексаметилентетраміном. Одержані модифіковані крохмалі забезпечили необхідні показники міцності картону з макулатури та низьку каламутність стічних вод. Вони покращили утримання маси на сітці та за цим показником перевищили значення для традиційних крохмалів. Виконували також дослідження [19] в напрямку визначення оптимальних умов використання модифікованих крохмальних клеїв у виробництві паперу для гофрування. Для проклеювання паперу застосовували модифікований кукурудзяний крохмаль концентрацією 0,8–1,35–1,6–1,8%.

Окремий блок досліджень присвячено катіонним крохмалю, які набули широкого застосування завдяки спорідненості до негативно заряджених поверхонь целюлозних волокон і мінеральних частинок [8, 10, 11]. Передбачається, що механізм їх дії полягає у посиленні електростатичної взаємодії та збільшенні кількості водневих зв'язків між фібрилами целюлозного волокна, що зумовлює зростання внутрішньої зв'язності полотна та опору руйнуванню.

У наукових публікаціях також розглядаються різні технологічні підходи до введення крохмалю у процес виробництва картону-лайнера. Найбільш

поширеними є додавання у волокнисту масу та поверхневе проклеювання [13, 17]. Перший метод забезпечує глибоке зміцнення структури, але потребує контролювання ретенції та в'язкості розчину, оскільки частина крохмалю може втрачатися зі стічними водами [17]. Поверхневе нанесення дозволяє підвищити поверхневу міцність, зменшити пористість і покращити друкарські властивості лайнера. Перспективним напрямом вважається технологія розпилення крохмалю, яка поєднує переваги обох підходів без суттєвого збільшення енергетичних витрат на сушіння.

Результати наукових досліджень демонструють, що використання катіонних і прежелатинізованих крохмалів сприяє підвищенню опору продавлюванню та жорсткості картону-лайнера [7–17]. Комбінування крохмалю з наповнювачами, інкапсульованими у крохмальну матрицю, дає можливість збільшити їх вміст без істотної втрати механічних характеристик, що є економічно доцільним за умов зростання вартості волокнистої сировини. Водночас встановлено, що саме модифікування крохмалю не забезпечує значного підвищення вологоміцності, тому дослідники рекомендують поєднувати його з латексними або водовідштовхувальними полімерними добавками. Сучасні публікації також акцентують увагу на екологічному аспекті використання модифікованих крохмалів. Перевагами є їх відновлюваність і біорозкладність, однак традиційні хімічні методи модифікування потребують контролю залишкових реагентів та показників стічних вод. У зв'язку з цим активно розвиваються “зелені” технології – ферментативні та фізико-хімічні методи, що мінімізують використання агресивних реагентів.

Попри вагомий обсяг наукових напрацювань, проблема обґрунтованого вибору виду та раціональної концентрації модифікованого крохмалю залишається відкритою для різних видів целюлозно-паперової сировини й конкретних технологічних умов виробництва [18, 19]. На практиці підприємства часто застосовують типові крохмальні композиції без урахування складу волокнистої маси та параметрів технологічного процесу. Такий підхід може спричиняти коливання якісних показників картону, надмірні витрати клейових матеріалів або недостатній рівень міцності готової продукції. Авторами статті [16] доведено, що одним із ключових завдань у виробництві гофрокартону є правильний підбір клейової композиції, що значною мірою визначає міцнісні та експлуатаційні властивості пакувальної продукції. У зв'язку з цим доцільним є проведення комплексних досліджень

впливу модифікованого кукурудзяного крохмалю на фізико-механічні властивості картону-лайнера в промислових умовах.

Постановка завдання. Метою статті є дослідити вплив виду та концентрації модифікованого кукурудзяного крохмалю на основні показники якості картону-лайнера для ефективного використання в промислових умовах.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження з виготовлення картону-лайнера та його випробування здійснювали в дослідній лабораторії ПАТ “Жидачівський целюлозно-паперовий комбінат”. Для виготовлення картону використовували макулатурну волокнисту масу марки МС-5Б, яка є типовою сировиною для виробництва картону-лайнера в Україні. Як модифікувальні добавки застосовували три види кукурудзяного крохмалю: катіонний, окиснений та ацетилований, концентрація яких становила 1 та 2% (табл. 1).

Для порівняння отриманих результатів виготовляли контрольні зразки картону: з додаванням нативного крохмалю та без застосування крохмальних добавок. Приготування волокнистої суспензії здійснювали у лабораторному гідропульпері об’ємом 20 л за концентрації 3 %. Подальше згущення маси проводили на ситі з розміром отворів 0,25 мм. Перед формуванням зразків вологість волокнистої маси становила 60–62 %. Дослідні зразки картону формували у два шари з метою відтворення структури промислового картону-лайнера (лицевий і зворотний шари). Обидва шари виготовляли з маси марки МС-5Б із введенням відповідної крохмальної добавки. Виготовлення картону здійснювали на папероробній машині № 3 відповідно до прийнятої технологічної схеми виробництва. З виготовленого картону готували зразки для визначення наступних показників згідно з вимогами відповідних стандартів: маси за площиною ДСТУ EN ISO 536:2017 [20], абсолютного опору продавлюванню ДСТУ EN ISO 2759:2022 [21] та руйнівного

зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку ДСТУ ISO 12192:2008 [22].

Отримані результати досліджень показали, що вид модифікованого крохмалю та підвищення його концентрації від 1 до 2 % збільшують масу картону-лайнера до 196,7 г/м² (рис. 2).

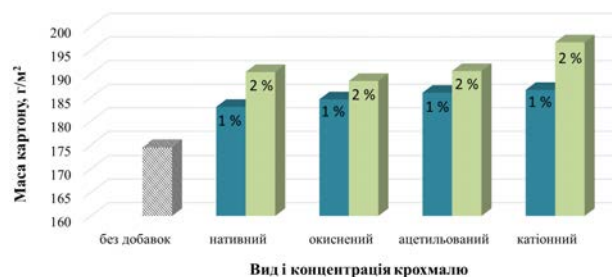


Рис. 2. Вплив концентрації різних видів крохмалю на масу картону-лайнера

Найбільший приріст маси картону спостерігається у разі застосування катіонного крохмалю концентрацією 2 %, що становить 12,7 % порівняно з контрольним зразком без крохмальних добавок. Це можна пояснити наявністю позитивно заряджених амонієвих груп, які взаємодіють з негативно зарядженими функціональними групами целюлозних волокон. Унаслідок цього підвищується ефективність адсорбції крохмалю на поверхні волокон, що сприяє кращому утриманню волоконних та дрібнодисперсних компонентів у структурі сформованого листа [23]. Ацетилований крохмаль забезпечує помірне збільшення маси картону-лайнера на 9,2 %, демонструючи водночас стабільність технологічного ефекту. Наявність ацетильних груп у структурі крохмалю сприяє підвищенню гідрофобності поверхні волокнистого матеріалу, що може позитивно впливати на водостійкість готового картону [11]. Використання окисненого крохмалю концентрацією 2 % також забезпечує статистично значуще зростання маси картону на 8,0 %. Позитивний ефект зумовлений нижчою молекулярною масою та підвищеною здатністю такого крохмалю

Таблиця 1

Характеристика крохмалю

№з/п	Вид крохмалю	Концентрація крохмалю, %	Хімічна характеристика	Рекомендована концентрація, % до сухої маси волокна
1	Нативний	1 2	Немодифікований, містить 27–28% амілози	1,0–2,0
2	Катіонний	1 2	Ступінь заміщення 0,035–0,045 (C–E4)	1,5–2,5
3	Окиснений	1 2	Вміст карбонільних груп 0,4–0,6%	2,0–3,0
4	Ацетилований	1 2	Ступінь ацетилювання 2,5–3,5%	2,0–3,0

проникати у пористу структуру волокнистого матеріалу, що сприяє більш рівномірному розподілу клейової композиції [12]. Нативний крохмаль також підвищує масу картону-лайнера на 9,1 %, до того ж величина приросту залежить від його концентрації та умов нанесення. Однак через високу в'язкість і обмежену адсорбцію на волокнах ефективність такого збільшення зазвичай нижча порівняно з модифікованими крохмалю [14].

Одним із ключових показників механічної міцності картону-лайнера є абсолютний опір продавлюванню, який характеризує здатність матеріалу витримувати навантаження, які ведуть до руйнування структури листа. Підвищення цього показника пов'язане з утворенням додаткових міжволоконних зв'язків водневого типу та зміцненням поверхневого шару картону після висихання крохмального покриття.

Результати експериментальних досліджень свідчать, що використання модифікованих кукурудзяних крохмалів забезпечує підвищення абсолютного опору продавлюванню картону-лайнера (рис. 3).

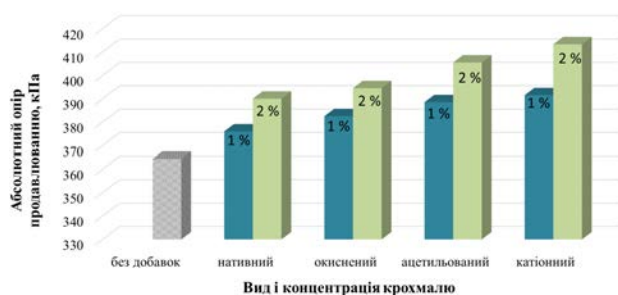


Рис. 3. Вплив концентрації різних видів крохмалю на абсолютний опір продавлюванню картону-лайнера

Найбільший вплив на абсолютний опір продавлюванню картону-лайнера спостерігається під час застосування катіонного крохмалю, для якого приріст показника може досягати 13,4 %. Це пояснюється високою спорідненістю катіонних полімерних груп до аніонних поверхонь целюлозних волокон, що сприяє формуванню більш міцних контактних зон між волокнами [8, 23]. Ацетилований крохмаль демонструє збалансований вплив на механічні та поверхневі властивості матеріалу, де абсолютний опір продавлюванню картону-лайнера зростає на 11,3 %. Використання окисненого крохмалю забезпечує підвищення опору продавлюванню приблизно на 8,3 %, тоді як вплив нативного крохмалю найменший – 7,0 %.

Важливим показником експлуатаційної придатності картону-лайнера є також руйнівне

зусилля під час стискання кільця, яке характеризує здатність матеріалу протистояти навантаженням у площині листа (рис. 4).

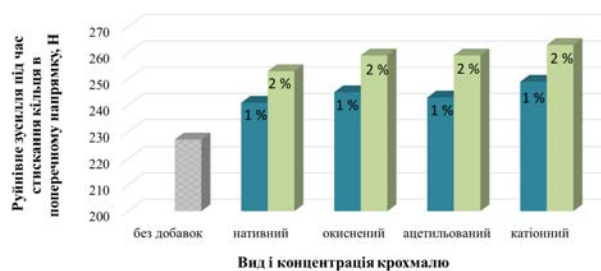


Рис. 4. Вплив концентрації різних видів крохмалю на руйнівне зусилля під час стискання кільця картону-лайнера

Цей показник безпосередньо впливає на несучу здатність гофрованого картону та є складовою параметрів оцінювання міцності транспортної тари. Експериментальні результати показали, що застосування модифікованих крохмалів підвищує руйнівне зусилля під час стискання кільця у поперечному напрямку на 13,7 %. Найбільший ефект зміцнення спостерігається під час використання катіонного крохмалю, що пояснюється його здатністю до електростатичної взаємодії з целюлозними волокнами та формування додаткових міжволоконних зв'язків. Окиснений та ацетилований крохмаль також сприяють підвищенню даного показника, однак їх вплив менш виражений і пов'язаний переважно з покращенням проникності та адгезійних властивостей у структурі волоконної сітки.

Висновки. За результатами проведених експериментальних досліджень встановлено, що застосування модифікованого кукурудзяного крохмалю є ефективним технологічним способом підвищення фізико-механічних властивостей картону-лайнера виготовленого з макулатурної волокнистої маси марки МС-5Б. Визначено, що найбільший зміцнювальний ефект забезпечує катіонний крохмаль, який завдяки електростатичній взаємодії з целюлозними волокнами підвищує міцнісні характеристики картону-лайнера. Збільшення концентрації крохмалю від 1 до 2 % надає додаткового зміцнення структури матеріалу.

Встановлено, що використання модифікованого кукурудзяного крохмалю сприяє підвищенню міцності картону та забезпечує відповідність отриманих показників вимогам ДСТУ для пакувального лайнера середнього класу міцності. Отримані результати підтверджують доцільність застосування модифікованого катіонного кукурудзяного

крохмалю у технології виробництва картону-лайнера з метою підвищення його якісних характеристик і ресурсної ефективності виробництва.

Дальші перспективи в цьому напрямку полягають у дослідженні впливу підвищених концен-

трацій модифікованого крохмалю на властивості картону-лайнера для уточнення оптимальних параметрів процесу поверхневого проклеювання з урахуванням економічної доцільності та можливого збільшення енерговитрат на сушіння картону.

Список літератури:

1. CEPI. Key Statistics: European pulp & paper industry 2023. Confederation of European Paper Industries, 2023. URL: <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2024/09/Key-Statistics-2023-FINAL-2.pdf> (дата звернення 19.02.2026).
2. FAO. Pulp and paper capacities: survey 2019–2024. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. URL: <https://www.fao.org/forestry-fao/statistics/80571/en/> (дата звернення 19.02.2026).
3. Sustainable packaging materials market: global forecast 2025 – 2034. Market statistics. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/sustainable-packaging-materials-market> (дата звернення 20.02.2026).
4. Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on packaging and packaging waste. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2025/40/oj> (дата звернення 20.02.2026).
5. Державна служба статистики України: офіційний сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 27.02.2026).
6. Асоціація “УкрПапір”. Підсумки роботи паперової галузі України за 10 місяців. URL: <https://gofromagazine.com/pidsumki-roboti-paperovoi-galuzi-ukraini-za-10-misyacziv.html> (дата звернення: 27.02.2026).
7. Li H., Qi Y., Zhao Y., Chi J., Cheng S. Starch and its derivatives for paper coatings: a review. *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 135. P. 213-227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.015>.
8. Xie F., Yu L., Liu H. and Chen L. Starch modification using reactive extrusion. *Starch – Starke*. 2006. Vol. 58, No. 3-4. P. 131-139. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.200500407>.
9. Yoon S.-Y., Deng Y. Clay-starch composites and their application in papermaking. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006. Vol. 100, No.2. P. 1032-1038. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.23007>.
10. Compart J., Singh A., Fettke J., Apriyanto A., Apriyanto A. Customizing Starch Properties: A Review of Starch Modifications and Their Applications. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No.16. P. 3491. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15163491>.
11. Watcharakitt J., Win E. E., Nimnuan J., Smith S. M. Modified Starch-Based Adhesives: a review. *Polymers*. 2022. Vol. 14, No. 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14102023>.
12. Luo P., Liu Y. H., Zhao X. Q., Song P. P., Tan N. S., Sun M. Y. Development of a starch adhesive for corrugated board under room temperature. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 179-180. P. 812-817. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.179-180.812>.
13. Sharipov M. Study of changes in the properties of starch during oxidation in the creation of a component of adhesive material for surface treatment of paper. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2022. Vol. 30, No. 1. P. 69-78. DOI: <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i1.249315>.
14. Halysh V., Trus I., Tverdokhlib M., Nosachova Y., Krysenko T., Hlushko O., Ploskonos V., Radovenchuk V., Gomelya M. Starch modification to ensure resource savings and environmental safety in the production cardboard from waste paper. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23, No. 11. P. 68–75. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/153393> ISSN 2299–8993.
15. Плосконос В. Г., Ластов'як Ю. Я., Назаренко, Д. С. Застосування модифікованих пшеничних крохмальних клеїв для підвищення фізико-механічних показників в процесах виробництва паперу та картону. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2020. Вип. 3. С. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2020.217908>.
16. Бойчук Н. В., Гавенко С.Ф., Вуйцик Л. Б. Гевусь О. І. Особливості технології виготовлення клеїв для гофрокартону. *Технологія і техніка друкарства*. 2009. № 4 (26). С. 139-141. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(26\).2009.57870](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(26).2009.57870).
17. Yulin D., Phil J., Leslie M., Ragauskas A. Starch-modified fillers for linerboard and paper grades: A perspective review. *TAPPI Journal*. 2010. Vol. 9, No. 4. P. 31-36.
18. Holik H. Handbook of paper and board. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. 524 p.
19. Плосконос В. Г., Букіна Я.І. Наукові аспекти пошуку оптимальних умов використання модифікованих кукурудзяних крохмальних клеїв у виробництві паперу та картону. *Міжнародний науковий журнал “Інтернаука”*. 2019. № 13 (75). С.42–51.
20. ДСТУ EN ISO 536:2017. Папір та картон. Метод визначення маси продукції площею 1 м². Чинний від 10.01.2017. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 10 с.

21. ДСТУ EN ISO 2759:2022. Картон. Визначення опору продавлюванню. Чинний від 15.08.2022. Київ : УкрНДНЦ, 2022. 10 с.
22. ДСТУ ISO 12192:2008. Папір і картон. Визначення міцності методом стиснення кільця. Чинний від 01.07.2008. Київ : УкрНДНЦ, 2008. 8 с.
23. Hubbe M.A. Nanocellulose, cationic starch and paper strength. *Appita Journal*. 2019. Vol. 72, No. 2. P. 82 – 94.

Kusniak I.I., Bekhta P.A., Kozak R.O., Kopansky M.M., Ortynska G.Ye., Bryn O.I., Salabay R.G., Tymyk D.V., Kriazhok S.A. INFLUENCE OF THE TYPE AND CONCENTRATION OF MODIFIED STARCH ON THE PROPERTIES OF LINERBOARD

The production of linerboard is a promising area of the pulp and paper industry due to the possibility of multiple recycling of fibrous raw materials and the environmental friendliness of packaging materials. At the same time, the use of recycled fibrous raw materials leads to a decrease in the strength characteristics of paperboard, which requires the search for effective ways to improve them. One of the promising technological solutions is the use of modified starches as strengthening additives.

This study investigates the influence of the type and concentration of modified corn starch on the physical and mechanical properties of linerboard produced from recycled fibrous pulp of grade MS-5B. For comparison of the research results, control cardboard samples were produced with the addition of native (natural) starch, as well as samples without the addition of starch additives. The fiber suspension was prepared in a laboratory hydropulper with a volume of 20 L at a concentration of 3 %, after which the pulp was thickened on a screen with a hole diameter of 0.25 mm. Before sheet forming, the moisture content of the fibrous pulp was 60–62 %. Experimental linerboard samples were formed in two layers (top and bottom) in order to reproduce the structure of industrial linerboard, using recycled pulp of grade MS-5B with the addition of different types of modified corn starch: cationic, oxidized, and acetylated at concentrations of 1 and 2 %. The cardboard was manufactured under industrial conditions on paper machine No. 3 in accordance with the established production process. For the obtained samples, grammage, bursting strength, and ring crush resistance in the cross direction were determined in accordance with the requirements of current standards.

The results showed that the use of modified corn starch improves the main strength indicators of linerboard. The greatest strengthening effect was provided by cationic starch, which can be explained by its electrostatic interaction with the negatively charged surfaces of cellulose fibers. Oxidized and acetylated starches also positively influence the structure of the fibrous network, improving adhesive properties and sheet formation uniformity. It was established that increasing the starch concentration from 1 to 2 % contributes to an increase in board grammage, bursting strength, and ring crush resistance. The obtained results confirm the feasibility of using modified cationic corn starch at a concentration of 2 % to increase the strength of linerboard and the efficiency of recycled fiber utilization, as well as compliance with national standard requirements for packaging linerboard of medium strength class, which will improve the resource efficiency of production.

Keywords: *linerboard, modified starch, cationic starch, oxidized starch, acetylated starch, physical and mechanical properties.*

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 665.585:615.263.63:661.185:615.282
DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/20>

Моргун В.І.

<https://orcid.org/0009-0001-1864-8820>
Херсонський національний технічний університет

Семешко О.Я.

<https://orcid.org/0000-0002-8309-5273>
Херсонський національний технічний університет

Салєба Л.В.

<https://orcid.org/0000-0002-8290-4163>
Херсонський національний технічний університет

РОЗРОБКА І ОЦІНКА ЯКОСТІ ТВЕРДОГО ШАМПУНЮ ПРОТИ ЛУПИ

Використання сульфатних шампунів приводить до руйнування природного ліпідного бар'єру, послаблення імунітету та неконтрольованого росту кількості патогенних мікроорганізмів, результатом діяльності яких є лупа. Лупа – поширена грибкова інфекція, спричинена грибом *Malassezia furfur*. Актуальність даної проблеми підштовхує на пошук рішень, одним із яких є розробка дієвої формули твердого шампуню проти лупи. Тверді шампуні відносяться до косметичних засобів по догляду за волоссям і шкірою голови із категорії натуральних, безпечних та екологічних. У своєму складі вони можуть містити різноманітні ефективні, а головне – природні компоненти, такі як олії, екстракти та мінерали. Метою дослідження є розробка безпечної, екологічно чистої, ефективної рецептури твердого шампуню, що містить активні компоненти проти лупи, включаючи олію авокадо, нім, чайного дерева, глинисті мінерали, гідролізати шовку і колагену, алантоїн, вітамін Е, Д-пантенол. Отриманий шампунь оцінювали за органолептичними, фізико-хімічними та сенсорними властивостями. Проведені випробування включали визначення рН, піноутворювальної здатності, стабільності піни, поверхневого натягу і дисперсії бруду. Результати показали, що твердий шампунь має слабо кисле рН (5,4), що відповідає стандартам догляду за волоссям. При підтримці певного кислотного рівня розвивається мікробіом шкіри голови, що забезпечує бар'єрну функцію, контролює жирність та забезпечує здоров'я волосся. Дослідження піноутворення підтвердили помірну стабільність піни, вимірювання поверхневого натягу (0,035 – 0,040 Н/м) показало активність поверхнево-активних речовин на рівні з синтетичними рідкими шампунями. Тест на ефективність видалення бруду і жиру показав високу очищувальну здатність запропонованої рецептури. Отримані сенсорні показники стану висушеного волосся і шкіри голови після миття розробленим твердим шампунем підтвердили переваги споживачів щодо натуральних, екологічно чистих косметичних продуктів.

Ключові слова: твердий шампунь, рецептура, стабільність піноутворення, проти лупи, сенсорні властивості.

Постановка проблеми. Одним із найбільш важливих продуктів для догляду за волоссям на косметичному ринку залишається шампунь. Традиційні рідкі шампуні та звичні мийні засоби часто містять хімічні інгредієнти, що викликають подразнення шкіри та мають негативний вплив на навколишнє середовище.

Останніми роками споживачі все частіше обирають продукти особистої гігієни, що містять натуральні і екологічні складові у рецептурі, тому попу-

лярності почали набувати тверді шампуні. Тверді шампуні є концентратом активних інгредієнтів, спресованих у формі бруска. Користь і безпечність шампуню залежить від поверхнево-активних речовин (ПАР), які входять до рецептури. Саме тому основою твердого шампуню є біологічно розкладні м'які ПАР, що не забруднюють довкілля: кокоїл ізетіонат натрію (Sodium Cocoyl Isethionate, SCI), кокосульфат натрію (Sodium Coco Sulfate, SCS) та лаурил саркозинат натрію (Sodium Lauryl

Sarcosinate), мильні горіхи [1]. До складу шампуню часто включають натуральні рослинні олії, натуральну глину, рослинні екстракти, ефірні олії, протеїни, вітаміни та інші біологічно активні інгредієнти [2, 3]. На відміну від рідких шампунів такий продукт потребує низької концентрації речовин з консервуючою дією, які пригнічують розвиток патогенних бактерій у поживному рідкому середовищі, та інших хімічних речовин, що можуть обтяжувати волосся і викликати алергічний контактний дерматит та інші алергічні реакції.

Відомо, що важливу роль в здоров'ї волосся відіграє мікробіом шкіри голови. Головною умовою для підтримання здорового стану – є баланс бактерій, що знаходяться на шкірі. При його порушенні з'являється дисбаланс, який приводить до негативних наслідків, таких як: свербіж, дисбактеріоз, випадіння волосся та лупа. До основних проблем волосистої частини шкіри голови можна віднести: вплив агресивних факторів навколишнього середовища (бруд, пил, оксиди азоту, тропосферний озон, поліциклічні ароматичні вуглеводні, леткі органічні сполуки); віковий фактор; сонячне випромінювання; термічну дію електроприладів (стайлери, фени, вирівнювачі); дисбактеріоз; паління; різні косметичні процедури (фарбування, висвітлювання, нарощування волосся, хімічні завивки та випрямлення) та окремо взяті компоненти різних косметичних засобів (лаків, масок, шампунів, лосьйонів, скрабів тощо) по догляду за волоссям, що можуть порушувати структуру волосся та загальний стан мікробіому [4].

Згідно з дослідженнями, приблизно 30% населення планети мають ознаки лупи – легке, незапальне захворювання шкіри голови, що характеризується лущенням шкіри. Трихологи вважають, що до появи лупи приводить посилення патогенності грибів роду *Malassezia*, а саме підвищення їх ліпофільних властивостей. До інших причин виникнення лупи відносять: порушення кислотно-лужного балансу шкіри голови та її гідроліпідної мантії; генетична спадкова схильність; гормональний дисбаланс (порушення в роботі ендокринної системи); зниження імунітету шкіри; емоційний стрес; харчування, захворювання шлунково-кишкового тракту та порушення обміну речовин; гіперфункція сальних залоз; дефіцит вітамінів групи А, В та цинку; алергічні реакції (в тому числі на агресивні компоненти промислових рідких шампунів); грибкові захворювання (зокрема паразитарного походження) [4, 5].

Актуальність даної проблеми підштовхує на пошук рішень, одним із яких є розробка дієвої формули твердого шампуню проти лупи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Чисельні дослідження в галузі мікробіології і дерматології вказують на прямий зв'язок між грибами роду *Malassezia* та лупою. Дослідження свідчать, що рід дріжджових грибів *Malassezia* є частиною природного мікробіому шкіри голови [5], але за певних умов відбувається підвищення їх ліпофільних властивостей, що призводить до посилення патогенності. Дослідження корейських вчених 2024 року [6] вказує на зростання колоній ліпофільних мікроорганізмів *Malassezia spp.* при посиленні секреції сальних залоз і збільшенні відлущення корнеоцитів. Також існує гіпотеза, що першопричиною є порушення імунної системи і шкірного бар'єру, які сприяють розвитку запальних реакцій шкіри та себореїного дерматиту. Окрім *Malassezia* етіологічне значення мають також бактерії *Staphylococcus epidermidis*, *Cutibacterium acnes*, *Streptococcus pyogenes* (групи А) та *Acinetobacter*, що знаходяться на поверхні та в шкірі волосистої частини голови [7, 8].

У лікувально-профілактичних шампунях та засобах догляду за волоссям використовують різноманітні протигрибкові активні речовини для лікування лупи. Найбільш популярними синтетичними компонентами по боротьбі з лупою є протигрибкові лікарські засоби для місцевого застосування: антибіотики (ністатин, натаміцин), похідні імідазолу та тріазолу (клотримазол, кетоназол, клімбазол) та інші (цинкова сіль піролідон-карбонової кислоти (L-PCA), мідь PCA, циклопірокс, саліцилова кислота, дисульфід селену, піроктон оламін). Однак, є повідомлення про багато побічних реакцій на ці сполуки, включаючи випадіння волосся, посилення головного болю, нудоту, лущення, свербіж та подразнення [9, 10]. Серед природних інгредієнтів, що володіють протизапальними властивостями, рекомендується використовувати березовий дьоготь, листя німу (*Azadirachta indica*), олію чайного дерева, ромашку, календулу, екстракт алое вера, кутібіом тощо [11].

Постановка завдання. Метою роботи є розробка лікувально-профілактичного твердого шампуню протигрибкової дії з використанням активних інгредієнтів, що зменшать запалення і сприятимуть активізації природних механізмів відновлення шкіри голови, та дослідження фізико-хімічних показників і стабільності розробленого засобу.

Виклад основного матеріалу. Під час розробки дієвої формули твердого шампуню виробники стикаються із проблемами кількості

Таблиця 1

Рецепт твердого шампуню проти лупи

Назва компоненту / INCI	%	Призначення в рецептурі
Кокоіл ізетіонат натрію / Sodium Cocoyl Isethionate	30	м'яка аніонна поверхнево-активна речовина, очищення
Кокосульфат натрію / Sodium Coco Sulfate	25	аніонна ПАВ, очищення
Кокамідопропіл бетаїн / Cocamidopropyl Betaine	9	амфотерна ПАВ, очищення, загущення, кондиціонуючий ефект
Цетеариловий спирт / Cetearyl Alcohol	4	емульгатор, стабілізатор, покращувач текстури, емомент
Стеаринова кислота / Stearic Acid	2	стабілізатор, структуроутворювач
Капрілік каприк тригліцерид / Caprylic Capric Triglyceride	2	емомент, зволожувач, енансер
Рицинова олія / Ricinus Communis Seed Oil	2	зволоження, живлення, зміцнення волосся, протизапальний та регулюючий себум агент
Олія Авокадо / Persea Gratissima (Avocado) Oil	2	емомент, антиоксидант, зволожувач, живлення волосся, протизапальний, регенеруючий агент
Олія Нім / Melia Azadirachta Seed Oil	4	антибактеріальний, протигрибковий, протизапальний зволожуючий агент
Комплекс мінералів / Red clay, Blue clay, Black clay	9	природний барвник, сорбент та антисептик
Сечовина / Urea pura	2	антисептик, м'який кератолітик, зволожувач
Консервант Cosgard / Benzyl alcohol, Dehydroacetic acid	1	консервант
Алантаїн / Allantoin	0,5	антирритант, кератолітик
Динатрієва сіль ЕДТА / Ethylenediaminetetraacetic acid	0,5	хелатуючий агент, покращує стабільність
Гідролізат шовку / Hydrolyzed Silk Protein	0,5	відновлювач структури волосся, вологоутримувач, кондиціонер
Гідролізат колагену / Hydrolyzed Collagen	0,5	
Д-пантенол / D-panthenol	0,5	провітамін В5, антиоксидант, вологоутримувач, протизапальний агент
Вітамін Е / Tocopheryl Acetate	0,5	антиоксидант
Олія чайного дерева / Melaleuca Alternifolia (Tea Tree) Leaf Extract	0,25	протигрибковий, протисвербіжний, антисептичний та протизапальний агент
Молочна кислота / Lactic Acid	0,15	регулятор pH
Вода демінералізована / Aqua	до 100	розчинник

і кремоподібності піни, пластичності бруска, його розтріскування, розм'якшення та швидкої втрати маси під час використання. Ця робота спрямована на вдосконалення рецептури твердого шампуню, що містить натуральні інгредієнти, оцінку його попередньої стабільності та характеристику показників якості.

Основними активними інгредієнтами запропонованої рецептури є комплекс натуральних олій (рицинова, авокадо, нім, чайного дерева), мінералів (суміш червоної, чорної та блакитної глини) та додаткових спеціальних компонентів, що направлені на зменшення проявів симптомів лупи та відновлення захисних функцій шкіри голови (гідролізати шовку та колагену, вітаміни). Розроблена рецептура твердого шампуню проти лупи наведена у табл. 1.

Розроблена формула шампуню буде одночасно ефективно боротися із патогенними мікроорганізмами і зводити наніведь можливі побічні реакції шкіри, живлячи та відновлюючи захисні ліпідні бар'єри. Для цього до рецептури шампуню вводили комплекс олій. Олія нім містить значну кількість жирних кислот (олеїнова, пальмітинова, стеаринова, арахідонова), а також німбін, дезацетилнімбін, німбастерол і приблизно 0,4% похідних сірки, завдяки яким знешкоджує бактеріальні причини появи лупи, усуває надлишкове виділення себуму, алергічні та запальні захворювання шкіри, стимулює ріст і нормальний стан волоссяного фолікула. Олія авокадо має регенеруючу та протизапальну дію; добре зволожує, пом'якшує, надає еластичність; добре розподіляється по шкірі за рахунок фітостеролів; виконує антиоксидантну дію. Олія чайного дерева використовується для лікування акне, грибкових інфекцій, лупи завдяки вмісту терпінеола (пригнічує бактерії), цинеолу (дезінфікує) та інших компонентів, що забезпечують протизапальний ефект. Гідролізати шовку і колагену захищають структуру волосся від пошкоджень, утримують вологу, попереджаючи ламкість та появу кінчиків, що січуться. Оскільки глинисті мінерали мають високу питому поверхню, сорбційну здатність, хімічну інертність та містять важливі мікроелементи, їх використання у складі шампуню виконує комплексну роль – це інертна основа, агент для стабілізації і збільшення щільності, адсорбент жиру [12]. Використання у рецептурі органічних і екологічно чистих інгредієнтів відповідає принципам сталого розвитку та екологічно свідомим практикам.

Для оцінки якості та ефективності зразків шампуню було проведено визначення піноутворювальної здатності та піностійкості, поверхневого натягу, тести на очищення та розсіювання бруду. Ефективність активних компонентів у боротьбі із грибковими збудниками оцінювалась за сенсорними властивостями за шкалою ASFS з використанням мікроскопу «Digital Microscope» та свербіжу за шкалою IGA [13]. Для прискорення визначення можливих ознак нестабільності зразки піддавалися стресовим умовам зберігання протягом 30 днів – напочатку при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$, потім при $40 \pm 2^\circ\text{C}$ та при охолодженні $5 \pm 1^\circ\text{C}$. Після чого оцінювалась якість зразків за органолептичними, фізико-хімічними та сенсорними показниками.

Органолептична оцінка проводилась за візуальним аналізом (зовнішній вигляд, здатність тримати форму, наявність тріщин, колір, запах) і аналізом текстури (твердістю, шершавістю поверхні і оцінкою внутрішньої міцності). Оскільки до зразку твердого шампуню вводили червону, блакитну і чорну глини, він має певні кольори, що не зафарбовують шкіру, незначну кількість невеликих тріщин, при цьому його структура тверда, не крихка; відповідає формі, при розрізанні не містить гранул; поверхня помірно шорстка на дотик; має виражений аромат олії німу.

Зразок розробленого засобу перевіряли на рівень рН за допомогою цифрового потенціометру РН818 у 10% водній витяжці при кімнатній температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Одразу після приготування твердого шампуню рівень рН дорівнював 5,1, завдяки регулюванню молочною кислотою, після його формування, висихання і протягом терміну зберігання рН складав 5,3 – 5,5. Таке значення рН вважається кислотним збалансованим і прийнятним, оскільки рівень кислотності шкіри голови коливається в межах від 4 до 5,7 од., а діапазон рН шампуню для волосся становить 5,0 – 7,0. Відсутність зміни рН протягом чотирьох тижнів вказує на фізичну стабільність. Піноутворювальна здатність та піностійкість твердого шампуню визначалась за адаптованим методом Росс-Майлса при

температурі розчину $37 \pm 2^\circ\text{C}$. Результати визначень наведені у табл. 2.

Отримані результати свідчать, що протягом чотирьох тижнів зберігання зразка твердого шампуню відбувається зростання піноутворювальної здатності при зберіганні помірної стабільності піни, що може свідчити про вплив активних інгредієнтів (комплексу олій та мінеральних глини) на стабілізацію текстури твердого шампуню. Визначена поверхнева активність за допомогою модифікованого сталагмометричного методу [14] підтверджує ефективність формули твердого шампуню як очищувального засобу і ефективної поверхнево-активної речовини. Поверхневий натяг знизився від 0,072 Н/м для води до 0,035 – 0,040 Н/м для 10% розчину твердого шампуню.

Ключовою функцією будь-якого шампуню є очищення, тверді шампуні досягають цього завдяки м'якій і ефективній очищувальній дії поверхнево-активних речовин. В роботі було проведено тест на ефективність видалення бруду і жиру з волосся розробленим шампунем проти лупи. Для цього 100% вовняна пряжа замочувалась на 20 хвилин у 10% розчині штучного шкірного сала (суміш 90 мл ацетону, 5 г кокосової та 5 г оливкової олії), висушувалась і піддавалась очищенню виготовленим зразком шампуню з наступним промиванням водою, висушуванням до постійної маси і зважуванням за методикою [14]. Ступінь очищення характеризувалась зміною маси зразків вовняної пряжі та оцінкою жирності вовни на дотик. Отримані результати показали 85% мийну здатність розробленої рецептури за відсотком видаленого шкірного сала, жир не відчувався на дотик на висушених зразках. У тесті на дисперсію бруду проводилась візуальна оцінка ефективності утримання чорнила в піні за характеристиками «Відсутня», «Легка», «Помірна» та «Сильна». Метод визначення дисперсії бруду дозволяє комплексно оцінити очисну здатність шампуню та його ефективність у запобіганні повторному забрудненню волосся. Вищі показники дисперсії відповідають кращим споживчим властивостям продукту. Для зразку твер-

Таблиця 2

Зміна показників якості зразка шампуню протягом зберігання

Назва показника		Термін зберігання, тижні				
		0	1	2	3	4
рН		5,3	5,5	5,5	5,4	5,4
Загальний об'єм і висота піни*, мл / мм	H ₀	5,3 / 126	5,3 / 126	7,7 / 139	11,0 / 155	13,0 / 165
	H ₅	4,3 / 121	4,3 / 121	5,1 / 126	8,4 / 142	10,4 / 152
Стійкість піни		0,96	0,96	0,90	0,91	0,93

* чисельник – об'єм піни, знаменник – висота піни, відповідно початкові і через 5 хв.

дого шампуню кількість чорнила, диспергованого в піні після 10 струшувань, була візуально визначена як «Легка» ступінь утримування, що свідчить про гарну здатність до диспергування, зв'язування бруду міцелами ПАР та утримання в мийному розчині.

Для оцінювання сенсорних властивостей шампуню, його впливу на волосся та шкіру голови було розроблено методику проведення і анкету самооцінки для фіксації результатів тестування в балах з використанням категоріальної шкали, яка варіюється від «відсутній» до «сильний» (від 0 до 5 балів). На тестування було виділено чотири тижні та залучено п'ять осіб з однаковою патологією шкіри голови. Під час оцінювання стану волосся відзначались такі характеристики: легкість розчісування, відчуття сухості, ступінь очищення, блиск, прикореневий об'єм, гнучкість волосся та статичну електрику. Для характеристики стану шкіри голови з ознаками лупи оцінювались ступінь очищення, залишки косметичного продукту, відчуття печіння, свербіж, стягнутість або сухість шкіри. Результати оцінювання п'ятьма респондентами після миття твердим шампунем від лупи представлені в балах у вигляді профілограм на рис. 1 і 2.

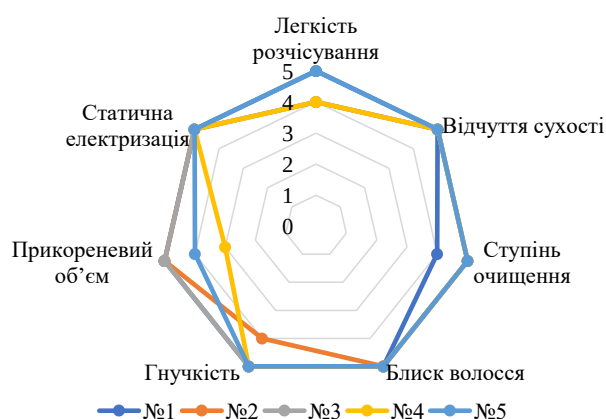


Рис. 1. Сенсорна оцінка висушеного волосся

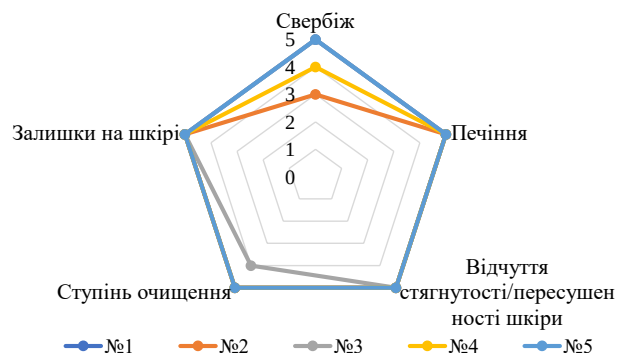


Рис. 2. Сенсорна оцінка шкіри голови

Результати сенсорних досліджень із залученням п'яти людей з ознаками лупи показали, що шампунь на відмінно справляється із поставленою задачею. Він добре вимиває надлишковий жир та бруд, не пересушуючи шкіру голови та волосся і не руйнуючи природний захисний ліпідний бар'єр. Після миття не було подразнень, сильного свербіжу та печіння, доводить ефективність розробленої рецептури.

Висновки. У даному дослідженні проведена розробка і оцінка ефективності твердого шампуню проти лупи з використанням природних активних інгредієнтів, включаючи олію нім, авокадо, чайного дерева, комплекс мінеральних глини, алантоїн, гідролізати шовку і колагену, вітаміни. Отримана рецептура продемонструвала високі фізико-хімічні і функціональні властивості, слабо кислий рН, гарну стабільність піноутворення, ефективне розсіювання бруду, високу поверхневу активність. Отримані результати сенсорного оцінювання підкреслюють, що розроблена рецептура забезпечує м'яке очищення при боротьбі з лупою, живлення і захисні властивості без побічних ефектів. Отримані результати показують перспективність подальших досліджень у цьому напрямку включаючи клінічні випробування.

Список літератури:

- Gubitosa, J., Rizzi, V., Fini, P., & Cosma, P. Hair Care Cosmetics: From Traditional Shampoo to Solid Clay and Herbal Shampoo, A Review. *Cosmetics*. 2019. 6(1). 13. <https://doi.org/10.3390/cosmetics6010013>
- Silva de Lima, L., et al. Development and evaluation of the effectiveness of the solid shampoo bar. *Biomedical and Biopharmaceutical Research*. 2023. 20(2). P. 28-42. <https://doi.org/10.19277/bbr.20.2.326>
- Kushwaha S. K., Chandel P., Singh T., Thakur M. Formulation and Evaluation of a Multicomponent Herbal Shampoo for Enhanced Hair and Scalp Health. *Current Pharmaceutical Research*. 2025. 1(3). P. 373-383. <https://doi.org/10.63785/cpr.2025.1.3.373383>
- Lin, Q., Panchamukhi, A., Li, P., Shan, W., Zhou, H., Hou, L., & Chen, W. Malassezia and Staphylococcus dominate scalp microbiome for seborrheic dermatitis. *Bioprocess and biosystems engineering*. 2021. 44(5). P.965–975. <https://doi.org/10.1007/s00449-020-02333-5>
- Boxberger, M., Cenizo, V., Cassir, N., & La Scola, B. Challenges in exploring and manipulating the human skin microbiome. *Microbiome*. 2021. 9(1). P.125. <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01062-5>

6. Joo, J.-H., Kim, J., Shin, J.-Y., Choi, Y.-H., Rim, H., Jun, S.-H., & Kang, N.-G. Management of Scalp Biofilm in Local Dermatitis: From In Vivo Visualization to Optimal Treatments. *Applied Sciences*. 2024. 14(21). 10008. <https://doi.org/10.3390/app142110008>
7. Saxena R., Mittal P., Clavaud C., *et al.* Comparison of healthy and dandruff scalp microbiome reveals the role of commensals in scalp health. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2018. 8. P. 346. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2018.00346>
8. Chang, C. H., & Chovatiya, R. More yeast, more problems?: reevaluating the role of *Malassezia* in seborrheic dermatitis. *Archives of dermatological research*. 2024. 316(4). P. 100. <https://doi.org/10.1007/s00403-024-02830-7>
9. Roik, O., Kliui, O., & Gorbyk, A. Study of the range of antifungal drugs for topical use in the pharmaceutical market of Ukraine. *Technologies and Engineering*. 2024. (5). P. 86–95. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.7>
10. Chih-Wei Hsieh, Mei-Eng Tu, Yu-Hung Wu, (2010) Allergic contact dermatitis induced by zinc pyrithione in shampoo: a case report. *Dermatologica Sinica*. 2010. 28(4). P. 163-166. [https://doi.org/10.1016/S1027-8117\(10\)60036-5](https://doi.org/10.1016/S1027-8117(10)60036-5)
11. Gleice Paula de Araujo, *et al.* Challenges, innovations, and trends in the context of microbial surfactants in the cosmetic industry. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2025. 69. 103799. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103799>
12. Carretero, M.I., Pozo, M. Clay and non-clay minerals in the pharmaceutical and cosmetic industries Part II. Active ingredients. *Applied Clay Science*. 2010. 47(3–4). P.171–181. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.10.016>
13. ASTM International E 2082-00. Standard Guide for Descriptive Analysis of Shampoo Performance. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://pdfcoffee.com/astm-e-2082-00-pdf-free.html>
14. Lohner, S. (2024, February 15). *Make Your Own Shampoo and Test How It Performs!* Retrieved from https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Chem_p109/chemistry/make-your-own-shampoo-and-test-how-it-performs?id=1131

Morgun V.I., Semeshko O.Ya., Saleba L.V. FORMULATION AND QUALITY EVALUATION OF AN ANTIDANDRUFF SOLID SHAMPOO

*The use of sulphate shampoos leads to the destruction of the natural lipid barrier; weakening immunity, and the uncontrolled growth of pathogenic microorganisms, resulting in dandruff. Dandruff is a common fungal infection caused by the fungus *Malassezia furfur*. The urgency of this problem prompts the search for solutions, one of which is the development of an effective formula for a solid shampoo against dandruff. Solid shampoos are natural, safe, and environmentally friendly hair and scalp care products. They can contain a variety of effective, and most importantly, natural ingredients, such as oils, extracts, and minerals. The aim of the study is to develop a safe, environmentally friendly, effective formula for a solid shampoo containing active ingredients against dandruff, including avocado, neem, tea tree oil, clay minerals, silk, and collagen hydrolysates, allantoin, vitamin E, and D-panthenol. The shampoo was evaluated for its organoleptic, physicochemical, and sensory properties. The tests conducted included pH, foaming ability, foam stability, surface tension, and dirt dispersion. The results showed that the solid shampoo has a slightly acidic pH (5.4), which meets hair care standards. When maintaining a specific acidic level, the scalp microbiome develops, providing a barrier function, regulating oiliness, and supporting hair health. Foaming studies confirmed moderate foam stability, and surface tension measurements (0.035–0.040 N/m) indicated surfactant activity comparable to that of synthetic liquid shampoos. The test for the effectiveness of removing dirt and grease demonstrated the developed formulation's high cleansing ability. The obtained sensory indicators of the condition of dried hair and scalp after washing with the developed solid shampoo confirmed consumers' preferences for natural, environmentally friendly cosmetic products.*

Keywords: solid shampoo, formulation, foaming stability, antidandruff, sensory properties.

Дата першого надходження статті до видання: 13.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Поліщук Б.В.

<https://orcid.org/0009-0001-5213-6191>

Український державний університет науки і технологій

Мітіна Н.Б.

<https://orcid.org/0000-0002-5384-7040>

Український державний університет науки і технологій

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВКЛАДИШАХ ПІЛЬГЕРНИХ СТАНІВ

У статті теоретично проведено аналіз застосування полімерних матеріалів як термостійких елементів. Важливою науково-практичною проблемою, що визначає техніко-економічну ефективність упровадження нових полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), є прогнозування їх експлуатаційних властивостей та моделювання поведінки в умовах реального навантаження. У виробничих умовах, виконано експеримент з розробки аналогу матеріалу для використання у якості підшипника ковзання пільгервалка пільгерстану. Проведено порівняльні дослідження вкладишів з матеріалів тимлон-7 та триболіт на знос та надійність подушок пільгерстану в виробничих умовах. Обрані ПКМ призначені для виготовлення конструкційних деталей вузлів тертя, що працюють в умовах нормальної та обмеженої подачі мастила, підвищеної запиленості, вібрації, в агресивних середовищах. У ході випробувань опрацьовані дані з обсягу прокатних труб та осей за кожним місцем встановлення у пільгерному стані № 1, № 2, визначено швидкість руйнування вкладишів, середня стійкість вкладишів із матеріалу триболіт, тимлон-7. Експериментальні вкладиші № 2 та № 3 з полімеру марки тимлон-7 показали підвищену зносостійкість більш ніж у два рази вищу порівняно з вкладишами з триболіту. Вкладиш № 2, встановлений у верхній подушці з приводного боку стану, зруйнувався після досягнення стійкості 1097,5 т/шт. Визначено, що вкладиш №3 зберігає працездатність при поточній стійкості і може бути використаний у нижніх подушках пільгерстану. Встановлено, що руйнування вкладиша № 4 було зумовлене його експлуатацією спільно з вкладишами з триболіту, які перебували в роботі та характеризуються іншими фізико-механічними властивостями і швидкістю зносу, що призвело до перекосу валка. Отримані результати свідчать про доцільність подальших випробувань вкладишів з полімеру марки тимлон-7 при їх встановленні у верхні та нижні подушки пільгерних станів № 1 та № 2.

Ключові слова: термостійкі полімери, полімерна композиція, вузли тертя, зносостійкість деталей, антифрикційні властивості, триболіт, тимлон, валки, вкладиш, пільгерний стан, пільгервалк, прокат, труби.

Постановка проблеми. На сьогодні приблизно від однієї третини до половини світових енергетичних ресурсів у тій чи іншій формі витрачається на подолання сил тертя, тому значення проблеми тертя та зношування деталей машин у сучасному високomeханізованому світі важко переоцінити. У зв'язку з цим сучасна промисловість потребує створення нових полімерних і полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Перспективним напрямом створення таких матеріалів є застосування різних способів модифікації відомих полімерів. Важливою науково-практичною проблемою, що визначає

техніко-економічну ефективність упровадження нових композиційних матеріалів, є прогнозування їх експлуатаційних властивостей, а також моделювання поведінки ПКМ в умовах реального навантаження. Тому подальший розвиток виробництва ПКМ на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) має ґрунтуватися на наукових засадах технології полімерів і композитів, прикладного матеріалознавства та фізико-хімічної механіки композитних структур.

Згідно з дослідженнями авторів [1], були розроблені дві жаро- та вогнестійкі термореактивні матриці на основі нового тетракізаміну, що містить циклотрифосфазен. Отримані смоли є пер-

спективними матеріалами для створення термо- та вогнестійких волокнистих композитів, клеїв, покриттів і ламінатів, які можуть бути використані в космічній, аерокосмічній та електронній галузях. Розроблений тетракізамін є універсальним мономером для синтезу широкого спектра термо- та вогнестійких сходових полімерів і може застосовуватися як ефективний агент зшивання.

Застосування полімерних матеріалів як термостійких елементів забезпечує підвищення надійності та ресурсу роботи машин, а в окремих випадках – дає змогу спростити конструкцію й технологію виготовлення вузлів тертя. Сукупність таких ключових фізико-механічних характеристик полімерів, як висока міцність, стійкість до задирок за умов обмеженого навантаження, здатність демпфувати вібрації та сприймати ударні навантаження, зумовлює їх широке впровадження як підшипникових матеріалів. Низький коефіцієнт тертя, висока зносостійкість, можливість роботи без мастила, толерантність до короточасних перевантажень і ударів, швидке припрацювання та здатність функціонувати в абразивному середовищі – саме ці властивості роблять полімери конкурентоспроможною альтернативою традиційним антифрикційним сплавам [2].

У сучасних машинах і механізмах як конструкційні та триботехнічні матеріали застосовуються метали та їх сплави, кераміка, полімери та полімерні композиційні матеріали, деревина, скло тощо. Водночас найбільш перспективними серед них є саме полімери та ПКМ [3 – 5], що підтверджується постійним зростанням обсягів їх використання у всіх галузях промисловості, які в останні роки суттєво перевищують споживання традиційних матеріалів.

Полімери та ПКМ на їх основі завдяки комплексу унікальних властивостей – відносно низькій собівартості виробів, високій хімічній стійкості, малій густині, здатності працювати у вузлах тертя без змащування тощо [6 – 8] – широко застосовуються практично в усіх сферах діяльності людини: від побутових виробів до відповідальних елементів ракетно-космічної техніки [9 – 12].

У зв'язку з цим актуальною науково-прикладною задачею є розробка нових підходів до створення полімерних композиційних матеріалів з підвищеними теплофізичними, фізико-механічними та трибологічними властивостями при одночасному зниженні собівартості за рахунок використання недефіцитної сировини та спрощення технології переробки. Зношування рухомих спряжень під дією сил тертя призводить до перед-

часного виходу машин з експлуатації та значних економічних витрат на їх ремонт, тому проблемам тертя і зношування в промислово розвинених країнах світу приділяється підвищена увага.

Особливо жорсткими умовами експлуатації характеризуються прокатні стани, вузли та деталі яких працюють при високих навантаженнях, швидкостях ковзання, підвищених температурах, а також за дії абразивних і агресивних середовищ протягом тривалого часу. У зв'язку з цим однією з основних проблем при їх розробці та впровадженні є забезпечення високого рівня надійності та довговічності. Одним із ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування нових конструкційних і триботехнічних матеріалів з покращеними експлуатаційними характеристиками. Тому, доцільним є дослідження композиційних матеріалів на основі термостійких полімерів для використання у вузлах тертя прокатних, зокрема пільгерних станів.

Постановка завдання. Метою статті є експериментальне дослідження ефективності застосування термостійких полімерних композиційних матеріалів для підвищення зносостійкості вкладишів пільгерного стану.

Виклад основного матеріалу. Об'єкти дослідження полімерні композиційні матеріали (ПКМ) тимлон та триболіт. Обрані ПКМ призначені для виготовлення конструкційних деталей вузлів тертя, що працюють в умовах нормальної та обмеженої подачі мастила, підвищеної запиленості, вібрації, в агресивних середовищах. Тимлон-7 (виробник Україна за чеською технологією) – модифікований антифрикційний полімерний матеріал наповнений рубленим скловолокном, дисульфідом молібдену. У порівнянні з поліамідами має кращу жорсткість та кращий опір повзучості, температура плавлення 290°C, має високий опір теплового старіння (табл. 1). Виходячи з цих якостей, тимлон-7 застосовується в областях де мають місце високі температури і такі матеріали як PA6, PA66, POM або PET не можуть забезпечити необхідні робочі характеристики, зокрема для підвищення зносостійкості вкладишів пільгерного стану.

Триболіт (вироблений за ТУ У 00186192.061-2000) є композицією вуглецевого і фенольного наповнювача сполученого з антифрикційними добавками, температура плавлення до 300°C.

Триболіт, це сучасний антифрикційний матеріал, що самозмазується на полімерній основі, спеціально розроблений для вузлів тертя, в порів-

нянні з капролоном володіє високою зносостійкістю, не схильний до деформації під навантаженням, має низький коефіцієнт тертя, витримує високі навантаження до 35 МПа у всьому діапазоні температур, не боїться агресивних середовищ, а також економить енергію за рахунок зниження втрати при терті, якщо застосовувати замість таких матеріалів як бабіт або бронзу. Характеристика триболіту марок БТФ (бавовняний наповню-

вач, текстоліт, фібра) та ВТФ (вуглецевий наповнювач, текстоліт, фібра) наведено в таблиці 2.

Опитне промислове випробування вкладишів із ПКМ тимлон-7 та триболіт-БТФ здійснено в умовах «Інтерпайп» м. Дніпро на пільгерстані № 1, № 2 елонгаторі ТПЦ-4. Проведено випробування трьох виробів. Зовнішній вигляд вкладок для подушок пільгерстану тимлон-7 та триболіт представлено на рисунку 1.



а)



б)

Рис. 1. Зовнішній вигляд зразків з полімерного композиційного матеріалу: а) тимлон-7, б) триболіт

Таблиця 1

Характеристика ПКМ марки тимлон-7

Найменування	Одиниці виміру	Показник
Щільність	г/см ³	1,19
Водопоглинення при 23°C	%	0,9
Водопоглинення після занурення у воду на 24/96 год	%	1,3/2,6
Температура плавлення	°C	290
Діапазон робочих температур	°C	Від мінус 40 до плюс 180
Межа плинності при розтягуванні	МПа	195
Деформація в межі плинності	%	18
Деформація під час розриву	%	25
Модуль пружності при розтягуванні	МПа	4400
Твердість по Брінелю	Н/мм ²	175
Ударна міцність по Шарпі	кДж/м ²	-
Твердість Роквелля	-	M92
Діелектрична міцність	кВ/мм	25
Об'ємний опір	Ом·см	більше 10 ¹⁴
Поверхневий опір	Ом	більше 10 ¹³

Таблиця 2

Характеристика ПКМ марки триболіт

Найменування показника	Одиниці виміру	Марка	
		БТФ	ВТФ
Щільність	г/см ³	1,30-1,50	1,30-1,50
Руйнівна напруга при стисканні перпендикулярно шарам, не менше	МПа	130	100
Руйнівна напруга при згинанні перпендикулярно шарам, не менше	МПа	108	90
Опір розколюванню вздовж шарів матеріалу, не більше	МПа	150	100
Масова частка зв'язуючого	кН/м	35-45	35-45
Ступінь заперечення матеріалу, не менше	%	88	88
Коефіцієнт тертя		0,03-0,15	0,03-0,15
Водопоглинення, не більше	%	1,0	0,8

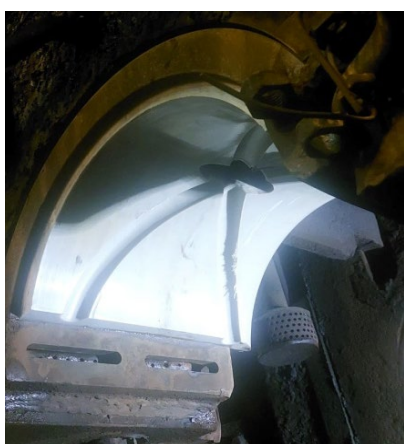


а)



б)

Рис. 2. Зовнішній вигляд розташування вкладишів з тимлон-7:
а) № 2 з приводної сторони; б) № 3 з холостої сторони



а) Привідна сторона



б) Холоста сторона

Рис. 3. Загальний вигляд вкладишів встановлених у верхні подушки: а) № 2, б) № 3

Для проведення експерименту вкладиші встановлювали в подушках пільгерстану № 2 і перебували в експлуатації: у нижній подушці з холостого боку вкладиш № 4 з триболіту; у верхніх подушках з тимлону-7: з приводного боку вкладиш № 2 (рис. 2 а); з холостого боку вкладиш № 3 (рис. 2 б).

Опитний вкладиш №4 з триболіту був встановлений позапланово в нижню подушку з холостого боку. Перекіс валка спричинив передчасне руйнування вкладиша який експлуатувався з уже працював вкладишем з матеріалу-Триболіту, що має інші технологічні характеристики та властивості (при високих температурах до 300°C відносно незначної втрати маси). За період експлуатації, прокатано 650 т труб, відповідно стійкість вкладишей з ПКМ Триболіт становила 162,5 т/шт.

Експериментальні вкладиші № 2 і № 3 з Тимлон-7, встановлені одночасно у верхні подушки: № 2 з приводної, а № 3 – з холостої сторони (рис. 3).

Тривалість експерименту десять діб у верхніх подушках пільгерстану №2 показала, що прокатано 4390,001 т з них 2302,651 т труб і 2087,35 т осей, що становить 52% та 47% відповідно. Зовнішній вигляд після виведення з експлуатації показано на рисунку 3. Після закінчення прокату при поточній стійкості 1097,5 т/шт зразки виробів вкладишів були вилучені для ревізії. Загальний вигляд робочої поверхні вкладишів з Тимлону-7 №2, №3 наведена на рисунку 4.

Виявлено, що вкладиш №2, який був встановлено з приводної сторони розрушився, вкладиш №3 підлягає подальшій експлуатації у нижній подушці. Огляд робочої поверхні для вкладиша №3, встановленого з холостого боку, показало нерівномірне зношування, а саме зменшення товщини на 5 мм у центральній зоні та на одному з коротких торців при збереженні номінальної товщини 35 мм на протилежному торці. Отже,



Рис. 4. Загальний вигляд фотофіксації робочій поверхні вкладишів з тимлону-7:
а) приводна сторона – № 2, б) холоста сторона – № 3

вкладиш №3 з тимлону-7 придатний для подальшої експлуатації та може використовуватись у нижніх подушках пільгерстану.

Висновки. Встановлено, що руйнування вкладиша № 4 було зумовлене його спільною роботою з вкладишами з триболіту, які характеризуються іншими фізико-механічними властивостями та швидкістю зносу, що спричинило перекис валка. Експериментальні вкладиші № 2 і № 3 з полімеру тимлон-7 продемонстрували більш ніж дворазове

підвищення зносостійкості порівняно з вкладишами з триболіту. Вкладиш № 2 досяг ресурсу 1097,5 т/шт, після чого був зруйнований, тоді як вкладиш № 3 за цього рівня навантаження зберіг працездатність і може бути використаний у нижніх подушках пільгерного стану. Отримані результати підтверджують доцільність подальших випробувань та розширення застосування полімерних вкладишів із матеріалу тимлон-7 у вузлах пільгерних станів.

Список літератури:

1. Kumar D., Gupta A. D., Khullar M. Heat-resistant thermosetting polymers based on a novel tetrakisaminophenoxycyclotriphosphazene // *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*. 1993. Vol. 31, № 11. P. 2739–2745 <https://doi.org/10.1002/POLA.1993.080311109>
2. Поліщук Б. В., Мітіна Н. Б. Питання щодо розробки полімерних композиційних матеріалів // *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 2. С. 300–304 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/40>
3. Liu Q., Tang Z., Ou B. та ін. Design, preparation, and application of ordered porous polymer materials // *Materials Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 144, Issue 3. P. 213–225 <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.01.013>
4. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2018. Vol. 1, Issue 2. P. 3–39. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2018.05.001>
5. Zhao W., Liu L., Zhang F. та ін. Shape memory polymers and their composites in biomedical applications // *Materials Science and Engineering: C*. 2019. Vol. 97. P. 864–883. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.12.054>
6. Bernède J. C. Materials for erasable optical disks // *Materials Chemistry and Physics*. 1992. Vol. 32, Issue 2. P. 189–195 [https://doi.org/10.1016/0254-0584\(92\)90276-E](https://doi.org/10.1016/0254-0584(92)90276-E)
7. Chiechi R. C., Havenith R. W. A., Hummelen J. C. та ін. Modern plastic solar cells: materials, mechanisms and modeling // *Materials Today*. 2013. Vol. 16, Issue 7–8. P. 281–289 <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.07.003>
8. Berry D. H., Wohl C. J. Aerospace and marine environments as design spaces for contamination-mitigating polymeric coatings // *Advances in Polymer Science*. Berlin : Springer, 2018. P. 1–16. https://doi.org/10.1007/12_2018_43
9. Zhong Y., Godwin P., Jin Y. та ін. Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: a mini-review // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2020. Vol. 3, Issue 1. P. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>
10. Kabat O., Sytar V., Sukhyi K. Antifrictional polymer composites based on aromatic polyamide and carbon black // *Chemistry & Chemical Technology*. 2018. Vol. 12, № 3. P. 326–333. <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326>

11. Sukhyi K. M., Belyanovskaya E. A., Sukhyi M. P. та ін. Obtaining technology for nanocomposites based on polyamide-6 and organomodified montmorillonite // *Journal of Chemistry and Technologies*. 2018. Vol. 26, Issue 1. P. 9–19. <https://doi.org/10.15421/081802>
12. Chervakov D. O., Bashtanyk P. I., Burmistr M. V. Modified polypropylene with improved physical-mechanical properties // *Mechanics of Composite Materials*. 2015. Vol. 51. P. 93–98. <https://doi.org/10.1007/s11029-015-9479-6>

Polishchuk B.V., Mitina N.B. PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF POLYMER PLAIN BEARINGS IN PILGER ROLLING MILLS

In this study, a theoretical analysis of the use of polymer materials as heat-resistant elements was carried out. An important scientific and practical problem that determines the techno-economic efficiency of implementing new polymer composite materials (PCM) is the prediction of their performance characteristics and the modeling of their behavior under real loading conditions. Under production conditions, an experiment was conducted to develop an analogous material for use as a sliding bearing for the pilger roll of a pilger mill. Comparative tests were performed on bushings made of Timlon-7 and Tribolite materials to evaluate wear and the reliability of pilger mill bearing housings under industrial operating conditions. The selected PCMs are intended for manufacturing structural components of friction units operating under normal and limited lubrication, increased dust content, vibration, and aggressive environments. During the tests, data were processed on the rolled pipe volume and shafts for each installation location in pilger mills No. 1 and No. 2, and the rate of bushing failure as well as the average service life of Tribolite and Timlon-7 bushings were determined. Experimental bushings No. 2 and No. 3 made of Timlon-7 demonstrated more than twice the wear resistance compared with Tribolite bushings. Bushing No. 2, installed in the upper bearing housing on the drive side of the mill, failed after reaching a service life of 1097.5 t/unit. It was determined that bushing No. 3 remains operational at the current service level and can be used in the lower bearing housings of the pilger mill. It was established that the failure of bushing No. 4 was caused by its simultaneous operation with Tribolite bushings, which had different physical and mechanical properties and wear rates, resulting in roll misalignment. The obtained results confirm the feasibility of further testing of bushings made of Timlon-7 polymer when installed in the upper and lower bearing housings of pilger mills No. 1 and No. 2.

Keywords: *heat-resistant polymers, polymer composite materials, friction units, wear resistance of components, antifriction properties, Tribolite, Timlon, rolls, bushings, pilger mill, pilger roll, rolling, pipes.*

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Скиба М.І.<https://orcid.org/0000-0003-4634-280X>

Український державний університет науки і технологій

СИНТЕЗ ТА ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЯ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛЮТАНТІВ

У статті здійснено дослідження щодо одержання та стабілізація/функціоналізація поверхні наночастинок золота (НЧ Au) із впливом на їх характеристики (середній розмір НЧ, розподілення за розміром, дзета-потенціал) для забезпечення ефективної взаємодії з сполуками-забрудниками-аналітами харчових продуктів та питної води при колориметричному визначенні. Для варіювання характеристик наночастинок було використано сучасні методи синтезу: плазмохімічний синтез із різними типами стабілізаторів/функціоналізаторів (цитрат натрію, карбокисметил целюлоза, полівініловий спирт, екстракт жому винограду та синтез екстрактом жому (банану), одержаними із використанням «зеленого» низькотемпературного евтектичного розчинника (холін хлорид-гліцерол). Продемонстровано, що одержані НЧ Au характеризуються піком лінії ППР $\lambda=520\text{--}530$ нм, $d_{\text{ср}}=20\text{--}55$ нм з розподіленням за розміром до 100 нм, ζ -потенціалом $-21,7\text{--}43,5$ мВ залежно від типу стабілізатора та способу синтезу. Як модельні сполуки-забрудники-аналіти харчових продуктів та питної води були використано гістамін та іони хрому. Встановлено, що при колориметричному виявленні поліутантів УФ-видимий спектр всіх одержаних Au НЧ демонстрував червоний зсув та зменшення інтенсивності піку поверхневого плазмонного резонансу (ППР) при $\lambda=530$ нм разом з появою піку $\lambda=650\text{--}700$ нм, що свідчить про агрегаційний механізм Au НЧ виявлення поліутантів. Встановлено, що тип стабілізатора має визначальне значення і впливає на колориметричну чутливість при близьких значеннях розміру НЧ. Межі виявлення (LOD) і кількісного визначення (LOQ) для виявлення гістаміну становлять 23,2–29,9 мг/л і 60,1–90,7 мг/л; 19,8–29,9 мг/л і 60,1–90,7 мг/л; залежно від типу стабілізатора/функціоналізатора для виявлення гістаміну. Встановлено, що вибір стабілізатора наночастинок безпосередньо впливає на чутливість колориметричної сенсорної системи.

Ключові слова: наночастинки, модифікація, плазмовий розряд, низькотемпературний евтектичний розчинник, екстракт, сенсор, колориметричний аналіз, оптичні методи аналізу, поліутанти, водне середовище.

Постановка проблеми. Розвиток нанотехнологій упродовж останніх десятиліть зумовив суттєвий прогрес у створенні функціональних матеріалів із заданими фізико-хімічними характеристиками. Особливе місце серед них посідають наноматеріали, властивості яких істотно відрізняються від об'ємних матеріалів унаслідок розмірних ефектів [1, 2]. Ці особливості визначають унікальні властивості наноматеріалів, що зумовлює їх широке застосування у різних галузях включно з сучасними технологіями аналітичного визначення поліутантів. Інтеграція наноматеріалів сенсори дала змогу істотно підвищити чутливість, селективність і межі виявлення аналітів порівняно з традиційними сенсорними системами [3, 4].

Серед різноманіття наноструктур особливу наукову та практичну зацікавленість становлять

наночастинки благородних металів, зокрема золота [4–8]. Останні характеризуються вираженим поверхнево-плазмонним резонансом, що становить основу їх унікальних оптичних і сенсорних характеристик. Особливу увагу привертає використання наночастинок золота як колориметричних складових/сенсорів, принцип дії яких ґрунтується на зміні спектральних характеристик поверхнево-плазмонного резонансу внаслідок агрегації або поверхневої взаємодії з аналітами.

Проте ефективність їх використання залежить від фізико-хімічних характеристик: розміру, форми, стабільності та функціоналізації поверхні, що, як відомо, обумовлено підходом (методом) та параметрами синтезу [10–12]. Відтак не достатньо вивченими на сьогодні залишаються залежності «розмір НЧ-стабілізатор-аналіт», що обмежує



Рис. 1. Застосування золотих наночастинок як біосенсорів

сферу їх використання, як колориметричних сенсорів поллютантів харчових продуктів та питної води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день перелік поллютантів харчових продуктів та питної води широкий. До пріоритетних забруднювачів води та харчових продуктів належать хімічних контамінантів біологічного походження, іони важких металів та пестициди [9-13]. На сьогодні відомо значну кількість публікацій [5-20] із даними щодо використання наносистем Au НЧ для їх детекції в харчових продуктах та водних ресурсах. Зазначається, що колориметричний аналіз наночастинок золота базується на зміні поверхневого плазмонного резонансу, спричиненого агрегацією Au НЧ та зміною морфології поверхні або міжчастинкової відстані. Наразі вважається, що механізм сенсорного сприйняття залежить від агрегації наночастинок та зміни ступеня дисперсії, викликані аналітом, що змінює міжчастинковий плазмонний зв'язок, виявлений за допомогою спектральних ліній ППР. Як правило, в дослідженнях використовуються різні, не спеціально підібрані та синтезовані наносистем золота з різними розмірними характеристиками (середній розмір НЧ, полідисперсність) в широкому діапазоні 5-60 нм та з різними типами стабілізаторів/функціоналізаторів наночастинок (Таблиця 1). При цьому, в більшості праць [8-20] не визначається вплив саме варіювання розміру наночастинок та підбір стабілізатора/функціоналізатора на колориметричну ефективність до різних типів аналітів.

Сенсиори на основі Au НЧ продемонстрували ефективність у виявленні мікробного забруднення, а саме у виявленні шкідливих бактерій, присутніх у джерелах води. Наприклад, попередні дослідження показали ідентифікацію *Escherichia coli* (*E. coli*) у зразках води за допомогою сенсорів на основі наночастинок золота (Au НЧ), що досягло порогів виявлення до 1 КУО/мл. Аналогічно, наночастинки золота (Au НЧ) були використані для виявлення кількох захворювань, включаючи сальмонелу. Біосенсиори на основі золотих наночастинок (Au НЧ) використовувалися в моніторингу якості води для точного виявлення важких металів. Загалом, повідомляється про селективне виявлення іонів важких металів із використанням наносистем Au НЧ, зокрема Hg^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} та Zn^{2+} , As^{3+} , Cd^{2+} і Cr^{3+} [7-20], а також низки біологічно активних молекул, хімічних контамінантів біологічного походження. Відтак до останньої категорії належить гістамін – біогенний амін, який часто асоціюється з алергічними реакціями та є значною причиною харчових отруєнь, що виникають внаслідок вживання зіпсованих продуктів. Європейська комісія визнала потенційний ризик гістаміну для здоров'я людини та встановила максимальні рівні в харчових продуктах, а також встановила жорсткі вимоги щодо селективного та чутливого визначення гістаміну.

Постановка завдання. Мета роботи – одержання та стабілізація/функціоналізація поверхні наночастинок золота із впливом на їх розмірні характеристики для забезпечення ефективної

взаємодії з сполуками-забрудниками-аналітами харчових продуктів та питної води при колориметричному визначенні.

Виклад основного матеріалу

Методика експериментальних досліджень

Наночастинки золота було синтезовано із використанням сучасних підходів: «зеленого» плазмохімічного способу із різними стабілізаторами [18-19] та синтезу із застосуванням екстракту, одержаного низькотемпературним евтектичним розчинником [21, 22]. В якості стабілізатора-функціоналізатора утворюваних наночастинок використовували представників різних типів стабілізаторів – цитрат натрію, карбоксиметил целюлозу та полівініловий спирт (табл. 2).

Оптичні спектри колоїдних розчинів реєстрували за допомогою спектрофотометра UV-5800PC (поглинання в діапазоні $\lambda=190-700$ нм) з використанням кварцових кювет. Величину дзета-потенціалу колоїдних систем визначали методом електрофоретичного руху частинок на приладі Zetasizer Nano-25 (Malvern Instruments Ltd., Малверн, Великобританія) для оцінки стабільності наночастинок у розчині.

Як сполуки-забрудники-аналіти харчових продуктів та питної води були використано гістамін та іони хрому.

Розчини аналіту готували шляхом розчинення певної кількості гістаміну в воді з у досліджуваній концентрації. Аліквоту розчину аналіту об'ємом 50 мкл додавали до 2,0 мл Au НЧ та давали прореагувати від 30 с до 1 хвилини для колориметричного тестування. Досліджуваний розчин характеризували за допомогою УФ-видимого випромінювання для отримання спектрів поглинання та оцінки змін піку поверхневого плазмонного резонансу (ППР) Au НЧ після додавання аналітів.

Отримані експериментальні результати

На рис. 2 наведено спектри одержаних колоїдних розчинів НЧ Au при використанні різних підходах синтезу: плазмохімічний синтез із традиційними стабілізаторами (а-б) та «зелений» синтез із використанням екстракту НЕР із жому

шкірки банану (г). Як відомо, плазмонний резонанс НЧ Au з діаметром $\sim d=20-80$ нм локалізований в УФ-частині видимого спектру (близько $\sim \lambda=520-600$ нм), що пояснює червоний/рожевий/фіолетовий колір таких золів. Видно, що одержані наносистеми золота проявляють виражений максимум ЛППР в характерному нанозолоту діапазоні $\lambda_{\text{макс}}=520-580$ нм, що характерні НЧ золота з розміром НЧ 30-60 нм.

В значній кількості робіт [1-5] наразі вже встановлено закономірність діаметру НЧ золота від довжини хвилі піку ЛППР. Прийнято вважати, що піки при ППР $\lambda=500-510$ нм відповідають діаметру частинок до 3-10 нм; $\lambda=520-560$ нм ($d=15-40$ нм), 570-600 нм ($d=60-80 \pm 100$ нм). Аналіз одержаних спектральних даних свідчить, що вже через 0,83-1-3 хв. обробки розрядом плазми виражено фіксуються піки ЛППР в діапазоні $\lambda=500-600$ нм ($A=0,2$ від.од.), що характерні НЧЗ з середнім розміром $\sim 10-80$ нм. Аналіз зображення – СЕМ типового одержаного зразка узгоджується з отриманими спектральними даними і на зображенні фіксуються фази агрегатів дрібних НЧ та окремо НЧ розміром.

При використанні екстракту шкірки банану НЕР синтез наночастинок Au відбувається повільніше ніж при плазмохімічному і виражений пік лінії ППР при $\lambda=530$ нм ($A=0,3$ від. од.) спостерігається через 35 хв. (рис. 1 г). Узагальнені данні впливу типу стабілізатора/функціоналізатора та способу синтезу на характеристики одержаних наночастинок золота представлено на рис. 3.

Здійснено дослідження використання наночастинок для колориметричного виявлення різних типів поліютантів: гістамін та важкі метали. У Європейського союзу рівень гістаміну в рибі не повинен перевищувати 100-200 мг/кг залежно від виду та методу обробки, тоді як Управління з контролю за якістю харчових продуктів і медикаментів США встановлює рівень дії для виявлення дефектів на рівні 50 мг/л. Визначення гістаміну було проведено для підтвердження можливості використання синтезованого сенсора Au НЧ для

Таблиця 2

Склад систем НЧ, що використовували для колориметричного визначення поліютантів

Тип стабілізатора/функціоналізатора	Співвідношення компонентів	Умови синтезу
Цитрат натрію	Au^{3+} (0,3 ммоль/л) $[\text{Au}^{3+}]/[\text{Цит}]=1]:[10]$	Плазмохімічний синтез
Карбоксиметил целюлоза	Au^{3+} 0,3 ммоль/л $[\text{Au}^{3+}]/[\text{КМЦ}]=1]:[4,5]$	
Полівініловий спирт	Au^{3+} 0,45 ммоль/л $[\text{Au}^{3+}]/[\text{ПВС}]=1]:[18]$	
Низькотемпературний евтектичний розчинник-екстракт	Au^{3+} (0,3 ммоль/л), розчин прекурсора з екстрактом НЕР у співвідношенні 1:10 об./об., а потім нагрівання реакційної суміші до 85-90°C	Хімічний синтез

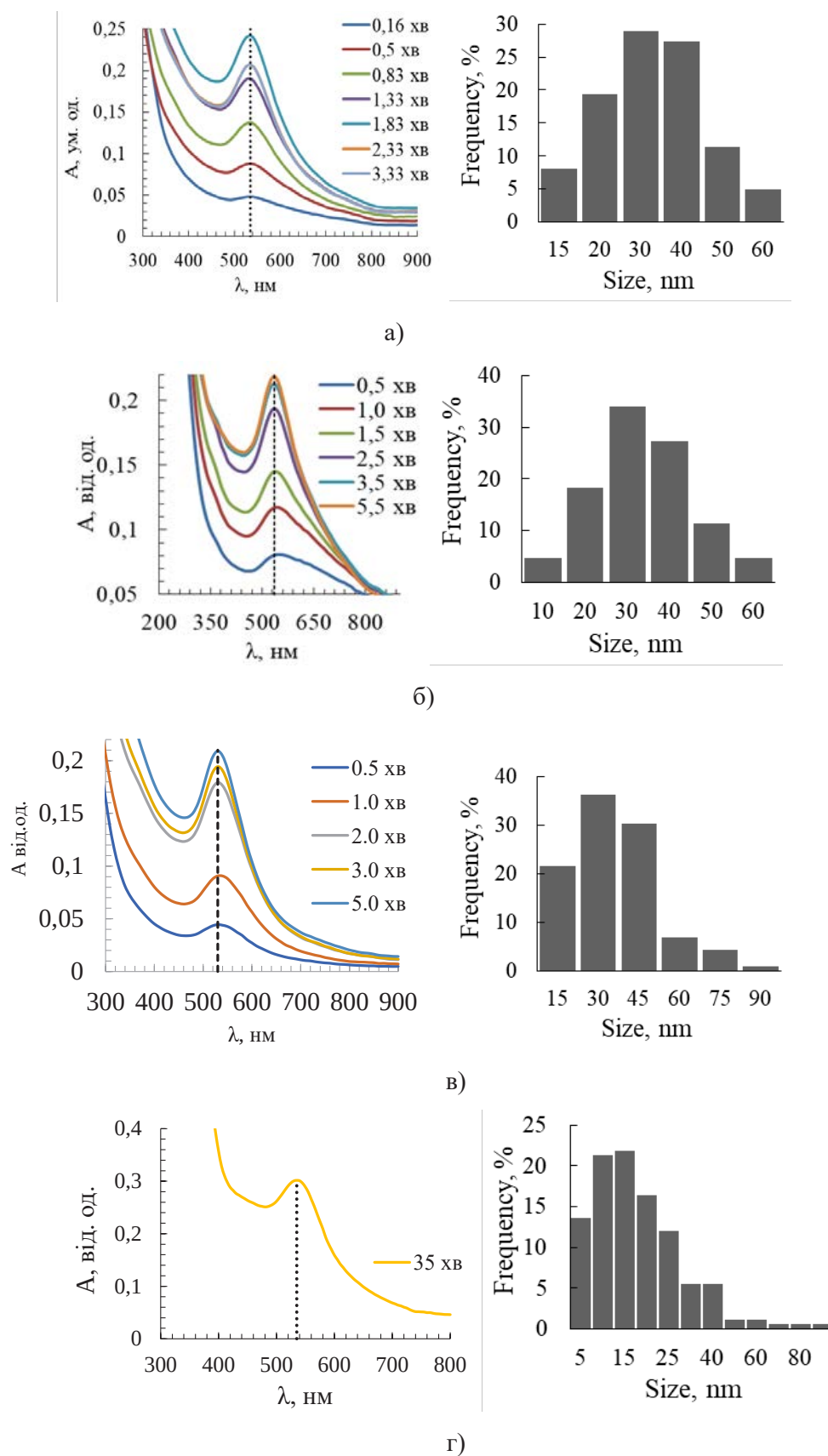


Рис. 2. Спектри Au НЧ при Au^{3+} (0,3 ммоль/л) залежно від тривалості синтезу та відповідні розподілення за розміром НЧ (за результатом СЕМ) з різними стабілізаторами при плазмохімічному синтезі: цитрат натрію (а)), карбоксиметилцеллюлоза (б)), полівініловий спирт (в)) та синтезі із використанням екстракту НЕР (г))

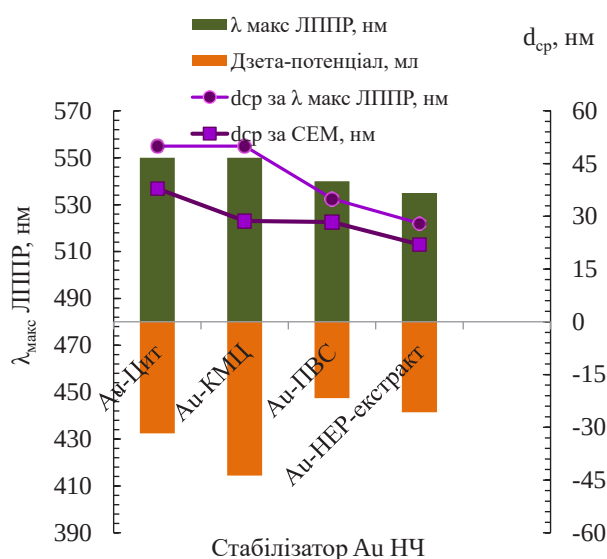


Рис. 3. Вплив типу стабілізатора/функціоналізатора та способу синтезу на характеристики одержаних наночастинок золота

швидкого колориметричного виявлення. Спостерігалися зміни спектрів поглинання та зміни кольору розчину, викликані взаємодією між гістаміном та Au НЧ. За спектрами поглинання можна спостерігати, що пік ППП поступово зміщується в бік більшої довжини хвилі зі збільшенням концентрації гістаміну, що пов'язано з індукованою гістаміном агрегацією Au НЧ. Для кожного зразка побудовано калібрувальні залежності A_{700}/A_{520} від концентрації гістаміну у діапазоні 1–40 мг/л. На основі нахилу регресії та стандартного відхилення залишків сигналу розраховано LOD і LOQ. Для зразка Au-Цит $\text{LOD} \approx 23,2$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 70,3$ мг/л; для зразка Au-КМЦ: $\text{LOD} \approx 19,8$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 60,1$ мг/л; для зразка Au-ПВС: $\text{LOD} \approx 29,9$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 90,7$ мг/л; для зразка Au-HEP: $\text{LOD} \approx 24,4$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 77,1$ мг/л;

Для дослідження реакції колориметричного сенсора на Cr(VI) з визначенням LOD та LOQ, були досліджені УФ-спектри поглинання Au НЧ та різних концентрацій Cr(VI) за оптимальних експериментальних умов [27]. Було виявлено, що значення поглинання при 690 нм також постійно зростає зі зростанням концентрації Cr(VI), що пояснюється збільшенням кількості агрегованих AuNPs зі збільшенням вмісту Cr(VI), а отже, і збільшенням поглинання. Після додавання Cr(VI) з'являється новий пік при 690 нм, що свідчить про агрегацію наночастинок. Зв'язок між співвідношенням поглинання при $A_{600}/$

A_{530} та Cr(VI) був використаний для створення лінійної кореляції. Дані показують лінійну кореляцію ($R^2 = 0,997$) між коефіцієнтом поглинання та концентрацією Cr(VI) у діапазоні 0,1–3,0 мкМ. Методи демонструють добру лінійність у діапазоні від 0,1 до 3,0 мкМ без значного впливу перешкод. Загальна ефективність зразків за чутливістю та точністю визначення хрому зменшується: Au-цитрат з $\text{LOD} \approx 0,0056$ мг/л та $\text{LOQ} \approx 0,0188$ мг/л $\rightarrow$ Au-КМЦ ($\text{LOD} \approx 0,0252$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 0,0839$ мг/л) $\rightarrow$ Au-ПВС ($\text{LOD} \approx 0,0407$ мг/л, $\text{LOQ} \approx 0,1357$ мг/л) $\rightarrow$ Au-HEP, який характеризується найвищими значеннями $\text{LOD} \approx 0,0440$ мг/л та $\text{LOQ} \approx 0,1468$ мг/л.

Висновки. Проведено дослідження синтезу та стабілізації/функціоналізації поверхні золотих наночастинок (Au НЧ) із контролем середнього розміру, розподілу за розміром та ζ -потенціалу для ефективної взаємодії з поліютантами та аналітами харчових продуктів і питної води. Використано сучасні методи плазмохімічного синтезу з різними стабілізаторами/функціоналізаторами, включно з цитратом натрію, карбоксиметилцелюлозою, полівініловим спиртом та рослинними екстрактами (жом винограду, банану) у низькотемпературних евтектичних розчинниках (холін хлорид-гліцерол). Модельними поліютантами для колориметричного визначення були гістамін та іони хрому. При взаємодії Au НЧ з поліютантами спостерігався червоний зсув та зменшення інтенсивності піку поверхневого плазмонного резонансу ($\lambda \approx 530$ нм) разом із появою нового піку ($\lambda \approx 650$ –700 нм), що підтверджує агрегаційний механізм колориметричного виявлення. Тип стабілізатора/функціоналізатора визначає колориметричну чутливість наночастинок навіть при близьких розмірах НЧ. Межі виявлення (LOD) та кількісного визначення (LOQ) гістаміну залежать від стабілізатора і складають 19,8–29,9 мг/л та 60,1–90,7 мг/л відповідно. Вибір стабілізатора наночастинок безпосередньо впливає на ефективність та чутливість колориметричної сенсорної системи, що є критичним для розробки високоефективних сенсорів для харчових продуктів та води.

Фінансування

2025.07/0078 «Створення та модифікація низькотемпературних евтектичних розчинників нового покоління як рідкофазних функціональних матеріалів: застосування для виявлення та контролю поліютантів широкого спектру» за конкурсом «Передова наука в Україні 2026-2028»

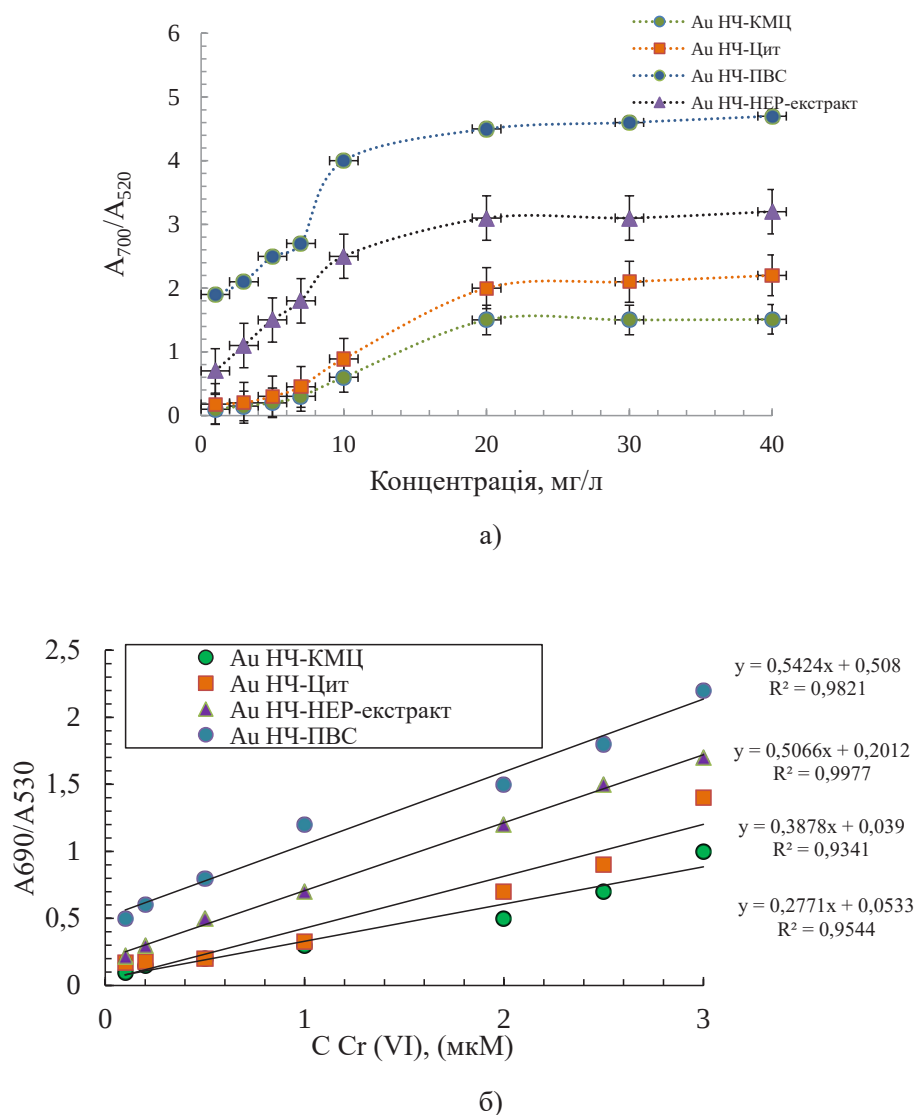


Рис. 4. Лінійна залежність між значенням поглинання (A_{700}/A_{520}) та концентрацією поллютанта: в діапазоні 0,02–40 мг/л для гістаміну (а) та іонів хрому 0,0052–0,156 мг/л (б))

Список літератури:

1. Baig N., Kammakam I., Falathabe W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Mater. Adv.* 2021. Vol. 2 (6). P. 1821–1871. <https://doi.org/10.1039/D0MA00807A>
2. Joudeh N., Linke D. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *J. Nanobiotechnol.*, 2022, 20, 262. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>
3. Lee Y., Haizan I., Sim S.B., Choi J.-H. Colorimetric Biosensors: Advancements in Nanomaterials and Cutting-Edge Detection Strategies. *Biosensors* 2025. Vol. 15 (6). P. 362. <https://doi.org/10.3390/bios15060362>
4. Cui Y., Zhao J., Li H. Chromogenic Mechanisms of Colorimetric Sensors Based on Gold Nanoparticles. *Biosensors* 2023. Vol. 13 (8). P. 801. <https://doi.org/10.3390/bios13080801>
5. Putri L.A., Prabowo Y.D., Maulina Dewi D.M., Mumtazah Z., Adila F.P., Fadillah G., Amrillah T., Triyana K., Nugroho F.A.A., Wasisto H.S. Review of Noble Metal Nanoparticle-Based Colorimetric Sensors for Food Safety Monitoring. *ACS Appl. Nano Mater.* 2024. Vol. 7 (17). P. 19821–19853. <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c04327>
6. Nadumane S.S., Biswas R., Mazumder N. Eco-friendly colorimetric detection of lead and mercury using l-cysteine-functionalized gold nanoparticles: a step towards greening the exposome. *RSC Adv.* 2025. Vol. 15 (15). P. 11573–11579. <https://doi.org/10.1039/D5RA01445J>
7. Duan X., Li X., Yang Q. A colorimetric sensor of functionalized gold nanoparticles for the identification of copper and magnesium ions based on SPR and Gaussian calculations. *Microchem. J.* 2025. Vol. 210. P. 112980. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.112980>

8. Cho H.H., Jung D.H., Heo J.H., Lee C.Y., Jeong S.Y., Lee J.H. Gold Nanoparticles as Exquisite Colorimetric Transducers for Water Pollutant Detection. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2023. Vol. 15 (16). P. 19785–19806. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c00627>
9. Guleria A., Sachdeva H., Saini K., Gupta K., Mathur J. Recent trends and advancements in synthesis and applications of plant-based green metal nanoparticles: A critical review. *Appl. Organomet. Chem.* 2022. Vol. 36 (6). P. e6778. <https://doi.org/10.1002/aoc.6778>
10. Sati A., Ranade T.N., Mali S.N., Ahmad Yasin H.K., Pratap A. Silver Nanoparticles (AgNPs): Comprehensive Insights into Bio/Synthesis, Key Influencing Factors, Multifaceted Applications, and Toxicity—A 2024 Update. *ACS Omega* 2025. Vol. 10 (8). P. 7549–7582. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11045>
11. Liu G., Lu M., Huang X., Li T., Xu D. Application of Gold-Nanoparticle Colorimetric Sensing to Rapid Food Safety Screening. *Sensors (Basel)* 2018. Vol. 18 (12). P. 4166. <https://doi.org/10.3390/s18124166>
12. Gebremedhin K.H., Kahsay M.H., Wegahita N.K., et al. Nanomaterial-based optical colorimetric sensors for rapid monitoring of inorganic arsenic species: a review. *Discover Nano* 2024. Vol. 19. P. 38. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-03981-2>
13. Priyadarshini E., Pradhan N. Gold nanoparticles as efficient sensors in colorimetric detection of toxic metal ions: A review. *Sensors Actuators B Chem.* 2017. Vol. 238. P. 888–902. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.06.081>
14. Cho H.H., Heo J.H., Jung D.H., et al. Portable Au Nanoparticle-Based Colorimetric Sensor Strip for Rapid On-Site Detection of Cd²⁺ Ions in Potable Water. *BioChip J* 2021. Vol. 15. P. 276–286. <https://doi.org/10.1007/s13206-021-00029-w>
15. Fahimi-Kashani N., Hormozi-Nezhad M.R. Gold-Nanoparticle-Based Colorimetric Sensor Array for Discrimination of Organophosphate Pesticides. *Anal. Chem.* 2016. Vol. 88 (16). P. 8099–8106. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b01616>
16. Alberti G., Zaroni C., Magnaghi L.R., Biesuz R. Gold and Silver Nanoparticle-Based Colorimetric Sensors: New Trends and Applications. *Chemosensors* 2021. Vol. 9 (11). P. 305. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9110305>
17. Zhang X., Kanaras A.G., Yin Y. Colorimetric Plasmonic Nanosensors for Environmental Pollution Monitoring. *Materials and Interfaces* 2025. Vol. 2 (3). P. 261–284. <https://doi.org/10.53941/mi.2025.100021>
18. Skiba M., Vorobyova V. Sustainable PVP-capped gold nanoparticles synthesis “green” chemistry plasma-liquid method and colorimetric activity for water pollutant chromium ion (Cr(VI)). *Gold Bull* 2025. Vol. 58. P. 15. <https://doi.org/10.1007/s13404-025-00368-8>
19. Skiba M., Velichko H., Skyba Y., Vorobyova V. Sustainable caffeine-capped gold nanoparticles synthesis «green» chemistry by plasma-liquid method: practical application - colorimetric visualization and antioxidant activity. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2026. Vol. 473. P. 116893. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2025.116893>
20. Sultana E., Al Mamun M.S. Golden eyes on pollutants: colorimetric detection of emerging contaminants with AuNPs. *RSC Adv.* 2025. Vol. 15 (39). P. 32833–32870. <https://doi.org/10.1039/D5RA01445J>
21. Vorobyova, V., Skiba, M., Vinnichuk, K. et al. Synthesis of gold nanoparticles using deep eutectic solvents and their incorporation into polyvinyl alcohol-based eutectogels: structural, chemical, and functional analysis. *Colloid Polym Sci* 303, 1213–1234 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00396-025-05403-w>
22. Skiba M.Yu., Skyba Y.M., Kovalenko I.L., Gnatko O.M., Radkevych T.O., Vorobyova V.I. Green Approach to the Synthesis of Gold Nanoparticles with Antimicrobial Activity Using Plant Extracts Based on a Deep Eutectic Solvent. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2025, No. 6, 63–71. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Skyba M.I. SYNTHESIS AND FUNCTIONALIZATION OF GOLD NANOPARTICLES FOR POLLUTANT DETECTION

The study investigated the synthesis, stabilization, and functionalization of gold nanoparticles (Au NPs) with respect to their characteristics (average particle size, size distribution, and zeta potential) to ensure effective interaction with pollutant-analyte compounds in food products and drinking water during colorimetric detection. Modern synthesis methods were employed to vary the nanoparticle characteristics, including plasma-chemical synthesis with different types of stabilizers/functionalizers (sodium citrate, carboxymethyl cellulose, polyvinyl alcohol, grape pomace extract, and banana pomace extract) obtained using a “green” low-temperature eutectic solvent (choline chloride–glycerol).

It was demonstrated that the obtained Au NPs exhibit a surface plasmon resonance (SPR) peak at $\lambda = 520\text{--}530\text{ nm}$, an average particle size (d_{avg}) of 20–55 nm, a size distribution up to 100 nm, and zeta potentials (ζ) ranging from -21.7 to 43.5 mV , depending on the type of stabilizer and synthesis method. Histamine and chromium ions were used as model pollutant-analyte compounds in food products and drinking water.

During colorimetric detection of pollutants, the UV–visible spectra of all synthesized Au NPs showed a red shift and a decrease in the SPR peak intensity at $\lambda = 530\text{ nm}$, along with the appearance of a new peak at $\lambda = 650\text{--}700\text{ nm}$, indicating an aggregation-based mechanism of Au NP detection. It was found that the type of stabilizer plays a decisive role and affects the colorimetric sensitivity at similar nanoparticle sizes.

The limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) for histamine detection were 23.2–29.9 mg/L and 60.1–90.7 mg/L, respectively, and 19.8–29.9 mg/L and 60.1–90.7 mg/L, depending on the type of stabilizer/functionalizer. It was established that the choice of nanoparticle stabilizer directly influences the sensitivity of the colorimetric sensor system.

Keywords: nanoparticles, modification, plasma discharge, low-temperature eutectic solvent, extract, sensor, colorimetric analysis, optical analysis methods, pollutants, aquatic environment.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.03.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 667.63

DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/23>**Солдатенков В.Ю.**<https://orcid.org/0009-0001-7431-6361>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мельник Л.І.<https://orcid.org/0000-0001-5139-3105>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

БІОНАПОВНЮВАЧІ ЯК ІНСТРУМЕНТ ФОРМУВАННЯ ІЄРАРХІЧНОЇ ШОРСТКОСТІ У СУПЕРГІДРОФОБНИХ ПОКРИТТЯХ

У статті розглянуто сучасні підходи до використання біонаповнювачів для створення супергідрофобних покриттів. Актуальність теми пов'язана з гострою потребою в екологічно чистих поверхнях, які водночас добре відштовхують воду і довго зберігають свої властивості в реальних умовах експлуатації.

Показано, що справжній супергідрофобний ефект виникає не лише завдяки низькій поверхневій енергії, а насамперед завдяки багаторівневій мікро- та наношорсткості, яка стабілізує режим Кассі–Бакстера. Водночас практичне застосування таких покриттів досі стримує кілька серйозних проблем: недостатня механічна міцність рельєфу, чутливість до зовнішніх впливів і значна фрагментованість літературних даних щодо методів оцінки їхнього ресурсу.

Метою роботи стала систематизація біонаповнювачів, які застосовуються у супергідрофобних покриттях. Основний акцент зроблено на їх морфологію, способи модифікації, сценарії введення в полімерну матрицю та вплив на довговічність покриття. Розглянуто полісахаридні біонаповнювачі та їх наноформи, лігнінові частинки, натуральні воски, агробіонаповнювачі, біовуглецеві матеріали та біогенні кремнеземні фази.

Обґрунтовано, що для аналізу цих матеріалів найзручніше класифікувати їх не тільки за хімічною природою, а й за морфологією, адже саме форма і структура частинок визначають, як саме формуватиметься ієрархічний рельєф і як надійно наповнювач закріпиться в матриці.

Показано, що поверхнева модифікація – це ключовий етап створення по-справжньому працездатних супергідрофобних систем. Вона одночасно знижує поверхневу енергію, покращує сумісність з плівкоутворювачем і стабілізує дисперсію. Окрему увагу приділено порівнянню двох основних сценаріїв введення біонаповнювачів: об'ємного введення в композицію та приповерхневого структурування. З'ясовано, що об'ємне введення сприяє формуванню міцнішого композитного каркаса і суттєво підвищує механічну стійкість покриття, тоді як приповерхнєве структурування дає значно кращі початкові показники змочування, але виявляється більш вразливим до абразивного зносу.

Систематизовано підходи до оцінки довговічності супергідрофобних покриттів і запропоновано мінімальний, але достатній набір показників для коректного порівняння результатів різних робіт. Цей набір включає крайовий кут змочування, кут скошування, гістерезис змочування, параметризовані випробування на абразію, оцінку стійкості до циклів зволоження/висушування, УФ- та хімічних впливів, а також морфологічний аналіз поверхні до і після навантажень.

Узагальнено, що ефективність біонаповнювачів залежить від цілого комплексу чинників: морфології частинок, способу їх модифікації, сценарію інтеграції в матрицю, умов плівкоутворення та стабільності сформованої поверхневої архітектури.

Ключові слова: біонаповнювачі, супергідрофобні покриття, ієрархічна шорсткість, поверхнева модифікація, полімерна матриця, приповерхнєве структурування, довговічність, крайовий кут змочування, кут скошування, абразивна стійкість.



Постановка проблеми. Супергідрофобні покриття справді привертають велику увагу завдяки здатності забезпечувати кілька корисних властивостей одночасно: самоочищення, захист від обмерзання, стійкість до корозії й менше забруднення поверхні. Їх ефективність залежить не лише від низької поверхневої енергії, а насамперед від правильного поєднання хімічного складу поверхні з багатошаровою мікро- та наношорсткістю. Саме така ієрархічна структура стабілізує режим Кассі–Бакстера і різко зменшує площу реального контакту між краплею й твердою поверхнею [1, 2].

Найголовніша проблема, яка досі стримує їх широке впровадження, – це довговічність. Мікро- і нанорельєф швидко руйнується від тертя, ударів, гідродинамічних навантажень, а ще через тріщини в плівці та втрату адгезії до основи. Тому термін служби таких покриттів визначається не лише геометрією шорсткості, а й міцністю самої матриці та надійністю зчеплення «покриття – підкладка» [3]. А якщо говорити про водні дисперсійні лакофарбові системи, то тут ще додаються складнощі з плівкоутворенням: як частинки злипаються, як дифундують, як мігрують компоненти й наскільки рівномірним виходить шар покриття. Усі ці процеси безпосередньо впливають і на бар’єрні властивості, і на те, наскільки довго збережеться потрібна архітектура поверхні [4, 5].

Саме тому біонаповнювачі – похідні целюлози, лігніну, хітину чи хітозану, крохмалю, біовугілля та природних мінеральних частинок – виглядають дуже перспективно. Вони допомагають свідомо створювати саме ту необхідну ієрархічну шорсткість та керувати нею. Однак наявні літературі дані є фрагментованими: результати залежать від форми частинок, їх поверхневої хімії та способу введення в покриття. Порівнювати результати важко ще й через різні методики вимірювання контактного кута, кута сколювання та зносостійкості. Тому актуальним є узагальнений підхід, який би чітко пов’язував тип біонаповнювача, спосіб його модифікації та введення в композицію, змочувальні характеристики й реальну довговічність покриття [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження розглядають супергідрофобні покриття, насамперед, як на результат розумного поєднання низькоенергетичної поверхні та багатошарової мікро- й наношорсткості. Саме завдяки цьому вдається підтримувати стабільний «несуцільний» контакт між краплею і твердою поверхнею. Тому зараз уже мало просто отримати

високий контактний кут – набагато важливіше правильно вимірювати гістерезис, кут сколювання й те, наскільки ці показники залишаються стабільними після реальних навантажень [1].

В останніх роботах чітко видно, як швидко зростає інтерес до біонаповнювачів як до повноцінних структуроутворюючих компонентів полімерних композиційних покриттів. В оглядовій статті Shigrekar et al. [6] систематизували дані про використання лігніну, целюлози, хітозану, крохмалю та інших біоматеріалів у таких системах. А статті Iqbal et al. [8] та Alimohammadzadeh et al. [9] окремо підкреслюють, наскільки перспективні саме наноструктуровані форми целюлози – целюлозні нанокристали (CNC) і целюлозні нанофібрили (CNF). Вони дають можливість свідомо керувати структурою рельєфу покриття.

Паралельно активно розвивається напрямок із біовуглицем (biochar). Він не лише створює потрібну шорсткість, а й може надавати додаткові функції – наприклад, фототермальний ефект, який допомагає боротися з обмерзанням [10, 11]. Однак найбільша проблема майже в усіх дослідженнях – це довговічність. Як зберегти рельєф і змочувальні властивості після абразії, циклів зволоження-висушування, ерозії чи хімічних впливів? Саме тому нові огляди все частіше акцентують увагу на механічній стійкості покриттів і на тому, що методики випробувань у різних лабораторіях дуже різняться [1, 12, 13].

До того ж навіть для найперспективніших біонаповнювачів кінцевий результат сильно залежить від того, як саме формується плівка і наскільки стабільна дисперсія. Особливо це критично для водних полімерних систем: тут розподіл частинок, їхня коалесценція й міграція компонентів часто визначають відтворюваність і довговічність результату [4, 5].

Отже, біонаповнювачі дійсно перспективні матеріали для супергідрофобних покриттів, однак залишається проблема порівнюваності результатів різних робіт, визначення зв’язу між морфологією частинок, їхньою модифікацією, способом введення та реальною довговічністю. А також який мінімальний, але достатній набір випробувань потрібен, для порівняння отриманих результатів.

Постановка завдання. Метою статті є системна класифікація біонаповнювачів, що використовуються для створення супергідрофобних покриттів. Головний акцент – на тому, як саме вони допомагають формувати ієрархічну шорсткість і забезпечувати стабільність усіх функцій.

ональних властивостей протягом тривалого терміну служби.

Щоб досягти поставленої мети, необхідно вирішити наступні завдання:

1. Класифікувати основні групи біонаповнювачів за їхнім походженням і морфологією, і чітко показати, яку роль кожна група відіграє на мікрота нанорівнях рельєфу.

2. Узагальнити існуючі підходи до поверхневої модифікації біонаповнювачів – від простої гідрофобізації до введення активних функціональних груп чи спеціальних промоторів адгезії – і продемонструвати, як саме ці модифікації впливають на сумісність наповнювачів із плівкоутворювачами.

3. Порівняти різні сценарії введення наповнювачів у систему і оцінити, як кожен з варіантів впливає на механічну стійкість покриття та на відтворюваність результатів.

4. Систематизувати найпоширеніші методи оцінки довговічності супергідрофобних покриттів і визначити мінімальний, але достатній набір показників, які доцільно обов'язково враховувати, при порівнянні результатів різних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Супергідрофобний стан поверхні зазвичай асоціюють із реалізацією режиму Кассі–Бакстера [14], за якого крапля рідини контактує з твердою поверхнею несучильно, а частина площі контакту припадає на повітряні порожнини рельєфу. У прикладних дослідженнях такий стан найчастіше характеризується крайовим кутом змочування водою (WCA) понад 150° та кутом скочування (SA) менше 10° . Водночас для коректного порівняння результатів різних робіт істотне значення має не лише досягнення цих порогових значень, а й облік гістерезису змочування, рухомості краплі та збереження зазначених параметрів після механічних, гідродинамічних чи хімічних навантажень [15].

У композитних покриттях біонаповнювач доцільно розглядати як ключовий структуроутворювач ієрархічної поверхні. Його функціональна роль реалізується через два взаємодоповнюючі механізми: створення опорної мікроструктури та подальшу нанорівневу добудову рельєфу. Саме принцип «мікрооснова + нанодобудова» є одним із найефективніших підходів для отримання механічно стійких супергідрофобних покриттів [15]. Ця логіка підтверджується як для систем на основі лігнінових частинок [16, 17], так і для композицій, що містять біоресурсні структуроутворювачі на базі олій та природних восків [18, 19].

З інженерної точки зору опис біонаповнювача варто розпочинати саме з його морфології,

оскільки саме вона найчастіше визначає сценарій формування поверхневої архітектури, тоді як хімічна природа матеріалу задає межі сумісності, можливості модифікації та міцності міжфазного зчеплення [6, 20]. До ключових параметрів належать форма частинок (0D-частинки, 1D-волокна чи нанофібрили, 3D-пористі структури), характерний розмір, ступінь агрегації, питома поверхня та здатність зберігати початкову архітектуру під дією зовнішніх навантажень [6, 20].

Переважає більшість біополімерних наповнювачів у вихідному стані є гідрофільними, тому їхній внесок у формування супергідрофобності має дві складові: структурну (створення необхідного рельєфу) та хімічну (зміну поверхневої енергії шляхом цілеспрямованої модифікації). Така двоїстість особливо характерна для целюлози, хітину та хітозану (рис. 1). Водночас надмірне зниження поверхневої енергії може негативно впливати на процеси диспергування, провокувати агломерацію частинок і знижувати відтворюваність поверхневої архітектури [21, 22]. Аналогічні ризики спостерігаються й у випадку використання агровідходів, де відсутність попередньої функціоналізації призводить до підвищеного водопоглинання та прискореної деструкції матеріалу [19].

З практичної точки зору вибір конкретного біонаповнювача доцільно здійснювати відповідно до логіки «структура → сумісність → ресурс»:

- структура визначає, який рівень рельєфу здатен формувати даний наповнювач [15];

- сумісність забезпечує стабільну дисперсію в матриці та кероване «виступання» структурних елементів на поверхню покриття [19, 21];

- ресурс характеризує здатність зберегти сформовану структуру після абразивного зношування, циклів зволоження–висушування та тривалого старіння [1, 16, 23].

Саме тому сучасні огляди наголошують, що вирішальним фактором є не сам матеріал як такий, а оптимальне поєднання його морфології, механізму закріплення в матриці покриття та відтворюваності поверхневої архітектури [6].

У межах цієї роботи під терміном «біонаповнювачі» розуміють дисперсні тверді компоненти біогенного походження – частинки, волокна та пористі фрагменти, отримані з відновлюваної біомаси або біогенних мінеральних джерел. Їх вводять у композицію покриття з метою формування ієрархічної структури поверхні та надання додаткових функціональних властивостей, зокрема механічного зміцнення, УФ-екранування, підвищення бар'єрності або фототермічного ефекту

[20, 24]. Таке визначення охоплює не лише біополімери, а й біовуглецеві та біогенно-мінеральні структуроутворювачі [10, 25, 26].

Класифікація біонаповнювачів (рис. 2).

Біонаповнювачі доцільно систематизувати за двома взаємодоповнювальними критеріями:

- за походженням або хімічною природою;
- за морфологією, оскільки саме морфологія визначає сценарій формування поверхневої архітектури, тоді як хімічна природа задає можливості модифікації та рівень сумісності з плівкоутворювачем [6, 20].

Перший базовий клас утворюють полісахаридні біонаповнювачі – целюлоза та її наноформи, хітин, хітозан, крохмаль і їх похідні (рис. 3).

Для цієї групи характерні висока питома поверхня та значна кількість полярних функціо-

нальних груп, тому їх внесок у досягнення супергідрофобності включає як структурний компонент (формування рельєфу), так і необхідність контрольованої гідрофобізації [6, 21]. У целюлозних системах особливо показовими є плівки на основі целюлозних нанокристалів (CNC), де потрібна ієрархічна архітектура виникає завдяки поєднанню процесів самоорганізації та поверхневої модифікації [9]. Для крохмальних систем також описано екологічно прийнятні маршрути, за яких наночастинки крохмалю виступають структуроутворювачами, а кінцевий результат залежить від балансу між формуванням рельєфу та гідрофобізацією [27].

Другий клас представлений лігніновими мікрота наночастинками, а також колоїдними формами

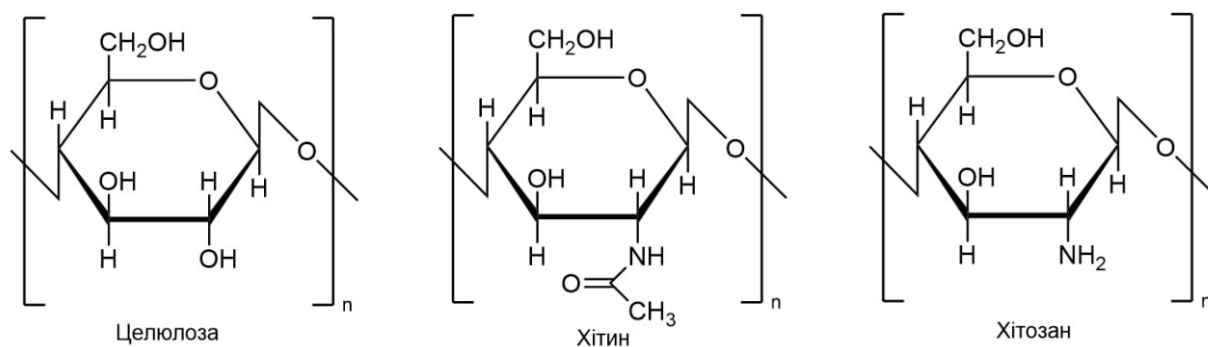


Рис. 1. Спрощені повторювані ланки целюлози, хітину та хітозану (схематично)

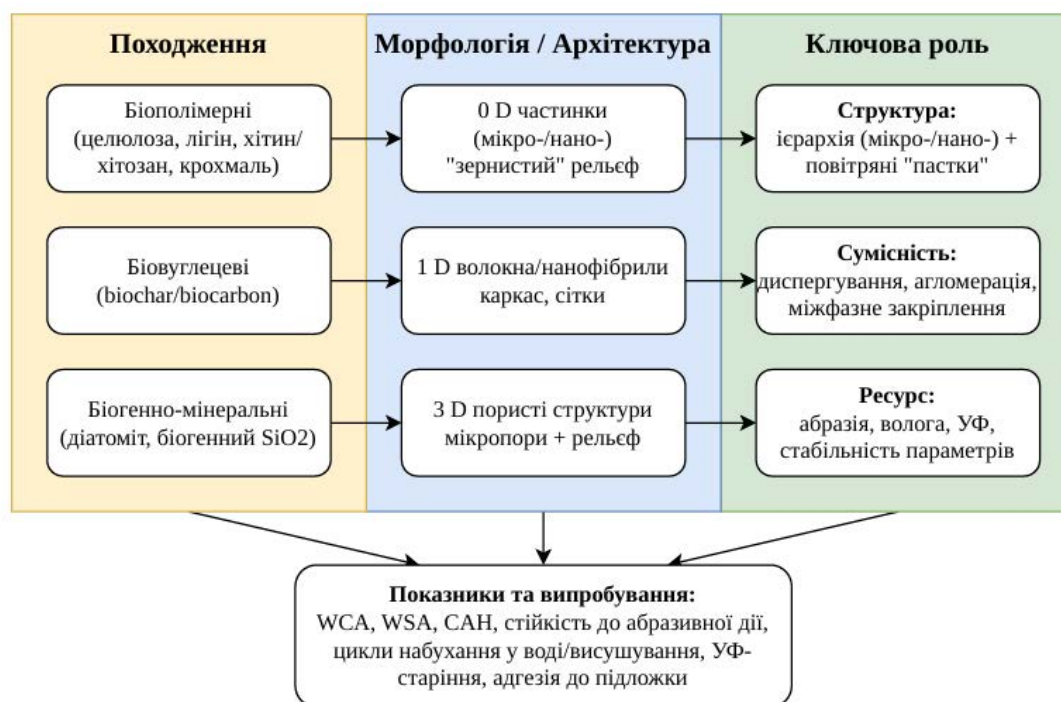


Рис. 2. Класифікація біонаповнювачів та їх роль у формуванні супергідрофобної поверхневої структури

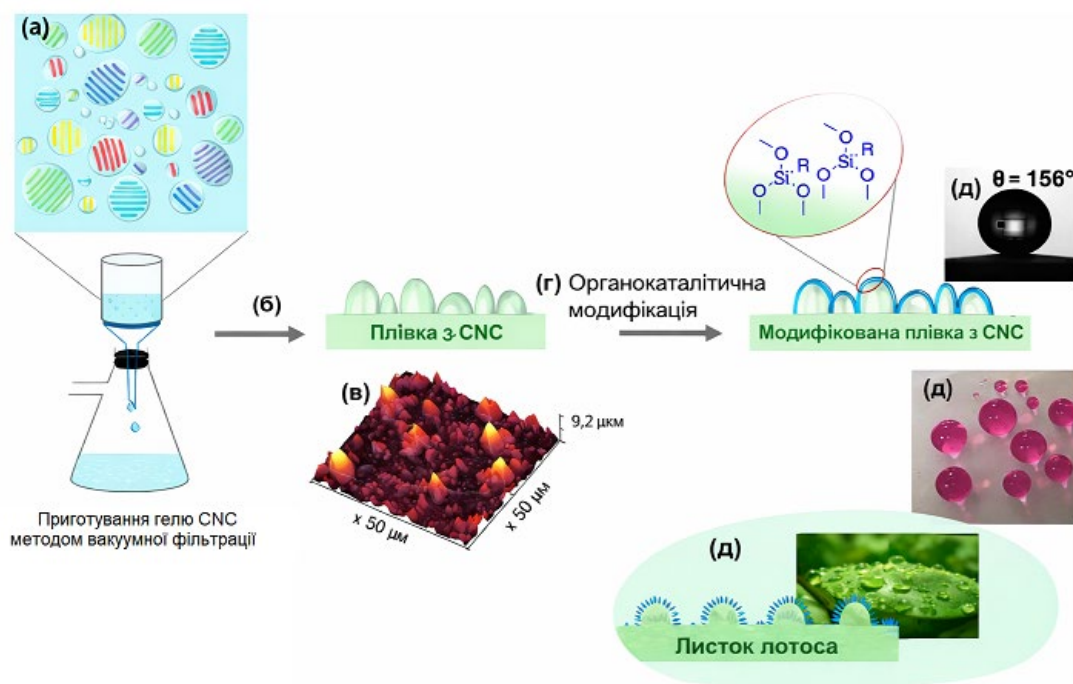


Рис. 3. Схема поєднання самоорганізації CNC та органокалітичної поверхневої модифікації для отримання супергідрофобної плівки. Адаптовано з [9]

лігніну. Вони поєднують зернисту морфологію з вираженим потенціалом УФ-екранування [16]. Лігнін розглядають як багатофункціональний біонаповнювач, здатний одночасно забезпечувати формування поверхневої структури та підвищувати стійкість покриття до зовнішніх впливів [16, 28]. Показовими є системи на основі гідротермально оброблених лігнінових наночастинок, нанесених методом розпилення, в яких досягнуто поєднання супергідрофобності, механічної та УФ-стійкості [29].

Третій клас складають натуральні воски та ліпідні біодисперсії. Вони часто виконують подвійну роль – не лише як низькоенергетичні компоненти, а й як структуроутворювачі завдяки власній кристалічній морфології. Для деревних підкладок описано супергідрофобні системи на основі комбінації рослинних олій і природних восків [18], а для водних лакофарбових матеріалів – використання карнаубського воску як багатофункціонального наповнювача [19]. Особливість воскових систем полягає в тому, що сам наповнювач уже має низьку поверхневу енергію, тому основним завданням стає забезпечення його рівномірного розподілу та надійної фіксації в плівці [30].

Четвертий клас – агробіонаповнювачі у формі порошків, отриманих із побічних продуктів сільськогосподарської та переробної промисловості. Їх головними перевагами є доступність і ресурсна

доцільність, проте вони майже завжди вимагають спеціального керування сумісністю з матрицею та контролю водочутливості. У водних фарбах, зокрема, показано, що порошок кісточок оливков може впливати на водопоглинання та бар'єрні властивості покриття, але кінцевий ефект визначається ефективністю закріплення частинок у плівці [19]. Через значну варіативність вихідної сировини цей клас доцільно розглядати окремо від «чистих» біополімерів [6].

П'ятий клас утворюють біовуглецеві наповнювачі (biocarbon/biochar), отримані шляхом термоконверсії біомаси. Вони формують розвинену тривимірну пористу архітектуру та можуть додавати покриттям УФ-захисні та фототермальні властивості [10, 11]. Для дерев'яних підкладок продемонстровано, що введення біовуглецю в тунгову олію забезпечує підвищення гідрофобності та атмосферостійкості, хоча результат суттєво залежить від стабільності дисперсії та морфологічних особливостей наповнювача [26].

Шостий клас представлений біогенними кремнеземними наповнювачами, насамперед діатомітом як біогенним SiO₂. Він функціонує як жорсткий мікрорельєфний каркас і носій пористості. Для таких систем показано отримання працездатних супергідрофобних покриттів із високою термічною та хімічною стійкістю [31]. На відміну від полісахаридних систем, тут вирішальне значення

мають поверхнева функціоналізація та надійне міжфазне закріплення в матриці [6].

Поверхнева модифікація біонаповнювачів

Більшість біонаповнювачів у вихідному стані є гідрофільними, тому для їх використання в супергідрофобних системах майже завжди необхідна попередня модифікація [1, 6, 21]. За відсутності такої модифікації частинки схильні до агломерації, утворюють нестабільні дисперсії, можуть занурюватися в товщу плівки та швидко втрачати функціональність під дією абразивного зношування, вологі та старіння [1, 15, 23].

Отже, модифікація має одночасно вирішувати три ключові завдання: зниження поверхневої енергії, забезпечення керованого розподілу наповнювача в композиції та формування надійних міжфазних «якорів» між наповнювачем і матрицею [1, 6]. Успішна модифікація завжди є компромісом: вона повинна бути достатньо ефективною для досягнення гідрофобізації, але не руйнувати вихідну морфологію частинок і не погіршувати технологічну керованість системи [21, 22].

На практиці модифікацію доцільно розглядати на трьох взаємопов'язаних рівнях:

- морфологічний контроль (фракціонування, керування полідисперсністю та формою частинок);
- хімічний контроль поверхні (зміна поверхневої енергії, заряду та афінності до матриці);
- контроль закріплення в плівці через ковалентні або нековалентні зв'язки [15, 23].

Для полісахаридних нанонаповнювачів характерним є компроміс між ступенем гідрофобізації та збереженням диспергованості й наноморфології. Саме тому для целюлозних наноструктур пріоритет надається «м'яким» методам функціоналізації [13, 21]. Автори Alimohammadzadeh et al. показали, що супергідрофобність прозорих плівок на основі целюлозних нанокристалів (CNC) може бути досягнута поєднанням процесів самоорганізації та органокаталітичної поверхневої модифікації без порушення нанотекстури [9]. Серед прикладних підходів найпоширенішими є силанізація, естерифікація, формування тонких функціональних шарів і анкерування довголанцюгових амінів [21, 32–34].

Для хітину та хітозану наявність аміногруп відкриває додаткові можливості хімічного налаштування поверхні та формування поліелектролітичних або координаційних зв'язків. Завдяки цьому для даних наповнювачів особливо перспективними є системи з додатковими функціональними властивостями, зокрема антибактеріальними, магнітно-керованими або підвищеною хімічною стійкістю [35, 36].

Для лігнінових частинок модифікація спрямована насамперед на контроль розміру, стабілізацію колоїдної форми та покращення адгезії до полімерної матриці. Це особливо важливо для водних покриттів по деревині та епоксидних систем, де інтерфейсна взаємодія безпосередньо визначає механічну стійкість і довговічність покриття [28, 37].

Для агробіонаповнювачів основними завданнями модифікації є зменшення водопоглинання та набухання, а також підвищення сумісності з водними або олійними плівкоутворювачами [19]. Натомість восково-ліпідні модифікатори можна розглядати як біогенний спосіб одночасного зниження поверхневої енергії та формування мікротекстури поверхні [18, 19]. Для біовуглецевих наповнювачів модифікація зазвичай зводиться до регулювання поверхневих кисневмісних груп і підбору зв'язуючого, що дозволяє досягти одночасно гідрофобності та атмосферостійкості [26, 38].

Незалежно від природи біонаповнювача, для супергідрофобних покриттів принципово важливим є не початкове значення крайового кута змочування, а збереження режиму змочування після деградації верхнього шару. Під час абразії та циклів намокання–висушування першими руйнуються саме поверхневі елементи структури, що призводить до зростання гістерезису кута змочування (САН) і погіршення самоочищення [39, 40]. Для біогенних пористих наповнювачів, зокрема діатоміту, перспективними є багатошарові архітектури, в яких один шар забезпечує захист, а інший – безпосередньо супергідрофобність [25]. У біовуглецевих системах додатковою перевагою є фототермічний ефект, який сприяє зменшенню обмерзання [10, 11].

Отже, модифікація біонаповнювачів у супергідрофобних покриттях має забезпечувати одночасно зниження змочуваності, рівномірний розподіл у композиції та стабільність сформованої поверхневої структури під дією експлуатаційних навантажень.

Сценарії введення біонаповнювачів у полімерну матрицю та їх вплив на механічну стійкість і відтворюваність супергідрофобного стану

У композитних супергідрофобних покриттях біонаповнювачі можуть вводитися двома основними сценаріями: об'ємним диспергуванням у плівкоутворювальній композиції або приповерхневим структуруванням, за якого структурують елементи концентруються переважно у верхньому шарі. Саме сценарій введення значною мірою визначає не лише ступінь прояву ієрархічної шорсткості, а й механічну стійкість

сформованого рельєфу, відтворюваність змочувальних характеристик і загальний ресурс супергідрофобного стану [4, 5].

Об'ємне введення передбачає рівномірне диспергування біочастинок у всьому об'ємі композиції з подальшим формуванням композитної плівки. Такий підхід забезпечує найвищий рівень механічної інтеграції наповнювача в матрицю, оскільки структурні елементи присутні по всій товщині шару і можуть утворювати просторовий каркас, що підвищує адгезію до підкладки та стійкість до абразивного зношування [16, 28]. Водночас за такого сценарію частина наповнювача залишається в товщі плівки, не беручи безпосередньої участі у формуванні поверхневої шорсткості, тому початкові значення крайового кута змочування водою і кута скочування часто виявляються нижчими, ніж у системах із приповерхневим розміщенням наповнювача [4, 5].

Приповерхнєве структурування реалізується через контрольовану міграцію частинок до поверхні, пошарове нанесення, розпилення або пошарове (LbL) складання, коли функціональні структурні елементи локалізуються переважно у верхніх мікрометрових шарах. Цей підхід забезпечує максимальну експозицію ієрархічної шорсткості та дозволяє досягати високих стартових значень WCA й низьких SA навіть за відносно невеликої кількості наповнювача [29, 36]. Однак механічна стійкість таких покриттів є нижчою, оскільки руйнування верхнього шару безпосередньо призводить до втрати функціонального рельєфу, а вирішальним фактором стає якість закріплення поверхневого шару на підкладці або в нижній матриці [3, 23].

Порівняння цих двох сценаріїв демонструє чіткий компроміс між вираженістю початкового супергідрофобного ефекту та довговічністю покриття. Об'ємне введення зазвичай забезпечує вищу механічну стійкість, кращу витривалість до абразії, зволоження та циклічних навантажень, а також вищу відтворюваність результатів за умови належного контролю реології та процесів плівкоутворення [4, 16, 28]. Натомість приповерхнєве структурування дозволяє ефективніше реалізувати поверхневий рельєф і досягти сильнішого стартового ефекту, проте є більш чутливим до ерозії, стирання та локального руйнування верхнього функціонального шару [23, 29, 36].

Таким чином, сценарій введення біонаповнювача слід розглядати як самостійний фактор проектування супергідрофобного покриття поряд із морфологією частинок, їхньою поверхневою

модифікацією та умовами плівкоутворення. Для систем, орієнтованих на максимальний початковий водовідштовхувальний ефект, доцільнішим є приповерхнєве структурування, тоді як для покриттів, у яких пріоритетом є механічна стійкість і тривала експлуатація, більш виправданим є об'ємне введення або комбіновані підходи, що поєднують переваги обох сценаріїв [4, 5, 16, 28, 29, 36].

Отже, ефективність біонаповнювача у супергідрофобному покритті визначається не лише його хімічною природою або способом гідрофобізації, а оптимальним поєднанням морфології, поверхневої модифікації, сценарію введення в матрицю та стійкості сформованої архітектури до експлуатаційних навантажень. Саме тому для коректного зіставлення літературних даних доцільно одночасно враховувати тип біонаповнювача, використаний модифікатор, спосіб інтеграції у покриття та досягнуті показники змочування й довговічності. Узагальнення цих параметрів для різних систем наведено в табл. 1.

Аналіз даних, наведених у табл. 1, наочно ілюструє сформульовані раніше закономірності: об'ємні системи (на основі лігніну в поєднанні з CNC, біовуглецю та діатоміту) забезпечують рекордну механічну витривалість, тоді як приповерхнєві системи (CNF, хітозан, карнаубський віск) демонструють найкращі початкові гідрофобні характеристики. Це підтверджує, що саме узгоджений вибір класу біонаповнювача, типу поверхневої модифікації та сценарію введення є визначальним фактором для створення довговічних, екологічно прийнятних і технологічно масштабованих супергідрофобних покриттів.

Таким чином, використання біонаповнювачів відкриває реальний шлях переходу від лабораторних демонстрацій до промислового впровадження водних і біобазованих лакофарбових систем, наділених самоочищувальними, льодовідштовхувальними та антикорозійними властивостями. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка гібридних біо- чи неорганічних систем із самовідновлювальними властивостями, створення повністю PFAS-free (не містить пер- та поліфторалкільних речовин) покриттів на основі природних восків і колоїдного лігніну, а також оптимізація процесів плівкоутворення у водних дисперсіях для досягнення максимальної відтворюваності в промисловому масштабі. Реалізація цих напрямів дозволить суттєво розширити сферу практичного застосування супергідрофобних матеріалів у будівництві, транспорті, енергетиці та охороні довкілля.

Приклади біонаповнювачів у супергідрофобних покриттях: модифікатори, характеристики та сценарії введення

Наповнювач (біо)	Клас / морфологія	Модифікатори (гідрофобізація / фіксація)	Сценарій введення	Характеристики (WCA / SA / стиранисть)	Джерело
Лігнінові наносфери (LNPs) + CNC	Лігнін + целюлоза (0D + 1D)	FOTS (CVD) + PVA як зв'язувач	Об'ємний (композит)	162° / 5°; зберігає супергідрофобність після 19 циклів абразії (наждак 800 mesh, 50 g)	41
Мікрочастинки CNF	Целюлоза (1D наночастинки)	MTMS + PDMS (адгезив)	Приповерхневий (плівка)	162,4° / <10°; після 50 циклів (200 g) – WCA 150,8°	42
L-CNC + SiO ₂ (гібрид)	Лігнін-модифікована целюлоза + неорганічний гібрид	FOTS + PDMS	Гібридний	161° / 7°; 50 циклів (50 g); додатково UV-стійкість ≈5 год (1000 W)	43
CNC@SiO ₂ @фосфорильований лігнін (PL)	Целюлоза + лігнін (стрижні)	MTMS + HDTMS + PDMS/епоксид	Об'ємний	157,4° / 6°; до 37 циклів (наждак 300 grit, 50 g)	44
Карнаубський віск + SiO ₂ (в тунговій олії)	Віск (0D кристалічні частинки)	Гідрофобні нано-SiO ₂	Приповерхневий / гібридний	155,5° / <10°; після 600 см абразії (800 mesh) – WCA ≈150°	45
Хітозан (PFAS-free покриття для тканин)	Азотовмісний полісахарид (1D)	Хімічно модифікований хітозан (без PFAS)	Приповерхневий	θA 151±2° / θR 136±3° (CAH ≈15°); збереження гідрофобності до 8 циклів прання після кислотного замочування	46
Біовуглець (biochar) з кукурудзяної соломи	Біовуглець (3D пористий)	Фототермальна обробка + PDMS	Об'ємний	>150° / <10°; висока стійкість до обмерзання та абразії (вітровий тунель)	10
Діатоміт (біогенний SiO ₂)	Біогенний мінерал (3D пористий)	Силанізація + епоксид/фторвільна смола	Об'ємний	>155° / <8°; висока термо- та хімічна стійкість (до 300 °C)	31

Висновки

1. Запропоновано двовимірну класифікацію біонаповнювачів (за хімічною природою та морфологією), яка чітко пов'язує тип частинок з рівнем рельєфу (мікро-, нано- або комбінований) і їхньою роллю в формуванні опорного каркаса.

2. Узагальнення підходів до поверхневої модифікації показало, що поверхнева модифікація (силанізація, естерифікація, анкерування довголанцюгових амінів, поліелектролітні шари) дозволяє одночасно знижувати поверхневу енергію, забезпечувати стабільну дисперсію та створювати надійні «якорі» адгезії, не руйнуючи морфологію біочастинок.

3. Встановлено, що об'ємне введення забезпечує найвищу механічну стійкість і ресурс покриття (до 19–50 циклів абразії без втрати супергідрофобності), тоді як приповерхнєве структурування дає максимальні початкові значення WCA/SA при мінімальних концентраціях, а гібридні підходи демонструють найкращий компроміс між змочуванням і довговічністю.

4. Узагальнення літературних даних показало, що для коректного порівняння результатів у роботах із супергідрофобними покриттями доцільно враховувати мінімально достатній набір показників, який має включати крайовий кут змочування водою (WCA), кут скочування (SA), гістерезис кута змочування (CAH), оцінювання абразивної стійкості, адгезії, стійкості до циклів зволоження/висушування, УФ- та хімічних впливів, а також морфологічний аналіз поверхні після навантажень. Такий підхід може слугувати орієнтиром для більш об'єктивного зіставлення результатів різних досліджень.

5. Загалом біонаповнювачі є перспективним інструментом формування ієрархічної шорсткості у супергідрофобних покриттях, однак їхня ефективність визначається не окремо “матеріалом”, а комплексом чинників: морфологією, модифікацією, сценарієм інтеграції, умовами плівкоутворення та стійкістю сформованої архітектури під навантаженням.

6. Найбільш перспективним напрямом подальших досліджень слід вважати розроблення біоба-

зованих систем, у яких поєднуються контрольоване формування багатомасштабної поверхневої структури, відмова від надлишково жорстких або

токсикологічно небажаних модифікаторів і використання уніфікованих протоколів випробувань для об'єктивного порівняння результатів.

Список літератури:

1. Parvate S., Dixit P., Chattopadhyay S. Superhydrophobic Surfaces: Insights from Theory and Experiment. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2020. Vol. 124, № 8. P. 1323–1360. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b08567>
2. Recent advances in bio-inspired superhydrophobic coatings utilizing hierarchical nanostructures for self-cleaning and anti-icing surfaces / F. Acha et al. *Physchem*. 2025. Vol. 5, № 4. P. 48. URL: <https://doi.org/10.3390/physchem5040048>
3. Mechanically durable superhydrophobic coating of poly(ethyl cyanoacrylate)/SiO₂/polydimethylsiloxane with superior abrasion resistance / X. Guo et al. *Progress in Organic Coatings*. 2024. Vol. 186. P. 108044. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108044>
4. From Wet to Protective: Film Formation in Waterborne Coatings / A. Arjmandi et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.4c09729>
5. Pieters K., Mekonnen T. Progress in Waterborne Polymer Dispersions for Coating Applications: Commercialized Systems and New Trends. *RSC Sustainability*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1039/d4su00267a>
6. Shigrekar M., Amdoskar V. A review on recent progress and techniques used for fabricating superhydrophobic coatings derived from biobased materials. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14, № 44. P. 32668–32699. URL: <https://doi.org/10.1039/d4ra04767b>
7. Novel environment-friendly superhydrophobic bio-based polymer derived from liquefied corncob for controlled-released fertilizer / S. Zhang et al. *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 151. P. 106018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106018>
8. A Review on Nanocellulose and Superhydrophobic Features for Advanced Water Treatment / D. Iqbal et al. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 12. P. 2343. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14122343>
9. Alimohammadzadeh R., Sanhueza I., Córdova A. Design and fabrication of superhydrophobic cellulose nanocrystal films by combination of self-assembly and organocatalysis. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, № 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29905-1>
10. Preparation of biochar-based photothermal superhydrophobic coating based on corn straw biogas residue and blade anti-icing performance by wind tunnel test / Z. Liu et al. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 210. P. 618–626. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.098>
11. Fluorine-Free and Robust Photothermal Superhydrophobic Coating Based on Biochar for Anti-/De-Icing / Y. Lei et al. *Coatings*. 2024. Vol. 14, № 7. P. 838. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings14070838>
12. Roles of adhesives in forming mechanically robust superhydrophobic coatings / J. Wei et al. *Chemical Science*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1039/d5sc05496f>
13. Habibi Y., Lucia L. A., Rojas O. J. Cellulose Nanocrystals: Chemistry, Self-Assembly, and Applications. *Chemical Reviews*. 2010. Vol. 110, № 6. P. 3479–3500. URL: <https://doi.org/10.1021/cr900339w>
14. Cassie A. B. D., Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*. 1944. Vol. 40. P. 546. URL: <https://doi.org/10.1039/tf9444000546>
15. Preparation of Robust Superhydrophobic Coatings Using Hydrophobic and Tough Micro/Nano Particles / T. Feng et al. *Coatings*. 2024. Vol. 14, № 9. P. 1156. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings14091156>
16. Lai X., Hu J., Qu J. A mussel-inspired lignin micro-nanospheres/epoxy composite coating with superhydrophobicity, ultraviolet resistance, and photothermal conversion performance for excellent corrosion control. *Progress in organic coatings*. 2025. Vol. 200. P. 109049. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.109049>
17. Valorization of lignin from biorefinery: colloidal lignin micro-nanospheres as multifunctional bio-based fillers for waterborne wood coating enhancement / X. Song et al. *ACS sustainable chemistry & engineering*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c03590>
18. Superhydrophobic coatings on wood made of plant oil and natural wax / J. Janesch et al. *Progress in organic coatings*. 2020. Vol. 148. P. 105891. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105891>
19. Calovi M., Rossi S. Functional olive pit powders: the role of the bio-based filler in reducing the water uptake phenomena of the waterborne paint. *Coatings*. 2023. Vol. 13, № 2. P. 442. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings13020442>
20. Pęsko M., Masek A. Plant-Based biofillers for polymer composites: characterization, surface modification, and application potential. *Polymers*. 2025. Vol. 17, № 17. P. 2286. URL: <https://doi.org/10.3390/polym17172286>

21. Superhydrophobic modification of cellulose and cotton textiles: methodologies and applications / D. W. Wei et al. *Journal of bioresources and bioproducts*. 2020. Vol. 5, № 1. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.03.001>
22. Eyley S., Thielemans W. Surface modification of cellulose nanocrystals. *Nanoscale*. 2014. Vol. 6, № 14. P. 7764–7779. URL: <https://doi.org/10.1039/C4NR01756K>
23. Study of structure influence on wear resistance of hierarchical superhydrophobic coatings / O. Myronyuk et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 3, № 12 (87). P. 44–49. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103028>
24. Green superhydrophobic surfaces: from natural substrates to sustainable fabrication processes / S. Wang et al. *Materials*. 2025. Vol. 18, № 18. P. 4270. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18184270>
25. Bilayer diatomite-based composite coatings with superhydrophobic and self-healing properties for enhanced anticorrosion of AZ31B magnesium alloys / Y. Wang et al. *Surface and coatings technology*. 2024. Vol. 489. P. 131151. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131151>
26. Sustainable biocarbon/tung oil coatings with hydrophobic and UV-shielding properties for outdoor wood substrates / L. Marrot et al. *Progress in organic coatings*. 2023. Vol. 177. P. 107428. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107428>
27. Eco-friendly and superhydrophobic nano-starch based coatings for self-cleaning application and oil-water separation / F. Wang et al. *Carbohydrate polymers*. 2021. Vol. 271. P. 118410. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118410>
28. Technological advancement in development of super-hydrophobic coatings for high-performance wood composites: a review / A. Kartikawati et al. *Progress in organic coatings*. 2025. Vol. 203. P. 109160. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109160>
29. Superhydrophobic coating with excellent robustness and UV resistance fabricated using hydrothermal treated lignin nanoparticles by one-step spray / C. Ren et al. *Journal of materials science*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07787-4>
30. Open coating with natural wax particles enables scalable, non-toxic hydrophobation of cellulose-based textiles / N. Forsman et al. *Carbohydrate polymers*. 2020. Vol. 227. P. 115363. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115363>
31. Durable and high-temperature-resistant superhydrophobic diatomite coatings for cooling applications / J. Pereira et al. *Coatings*. 2024. Vol. 14, № 7. P. 805. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings14070805>
32. Superhydrophobic alkylsilane functionalized cellulose beads for efficient oil/water separation / B. El Allaoui et al. *Journal of water process engineering*. 2023. Vol. 54. P. 104015. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104015>
33. Zhan A., Abdalkarim S. Y. H., Yu H.-Y. Sustainable cellulose nanocrystal based hydrophobic coatings with excellent self-cleaning and high thermal stability for multi-scenario applications. *Industrial crops and products*. 2023. Vol. 204. P. 117382. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117382>
34. Sustainable and versatile superhydrophobic cellulose nanocrystals / H. Xiang et al. *ACS sustainable chemistry & engineering*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00311>
35. Photothermal Superhydrophobic Chitosan-Based Cotton Fabric for Rapid Deicing and Oil/Water Separation / Q. Xue et al. *Langmuir*. 2023. Vol. 39, № 28. P. 9912–9923. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c01144>
36. Bioinspired, durable, and biocompatible superhydrophobic layer-by-layer assembled coatings from chitin nanofibers / Y. Zhang et al. *Carbohydrate polymers*. 2025. Vol. 351. P. 123016. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.123016>
37. Colloidal lignin particles and epoxies for bio-based, durable, and multiresistant nanostructured coatings / K. A. Henn et al. *ACS applied materials & interfaces*. 2021. Vol. 13, № 29. P. 34793–34806. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c06087>
38. Zouari M., Marrot L., DeVallance D. B. Functional biocarbon-based coatings for wood protection and indoor air depollution. *Building and environment*. 2024. Vol. 261. P. 111716. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111716>
39. Mechanically durable superhydrophobic surfaces / T. Verho et al. *Advanced materials*. 2010. Vol. 23, № 5. P. 673–678. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.201003129>
40. Milionis A., Loth E., Bayer I. S. Recent advances in the mechanical durability of superhydrophobic materials. *Advances in colloid and interface science*. 2016. Vol. 229. P. 57–79. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.12.007>
41. Preparation of lignin nanospheres based superhydrophobic surfaces with good robustness and long UV resistance / M. Li et al. *RSC advances*. 2022. Vol. 12, № 18. P. 11517–11525. URL: <https://doi.org/10.1039/d2ra01245f>
42. Preparation of CNF/PDMS superhydrophobic coatings with good abrasion resistance using a one-step spray method / J. Huang et al. *Materials*. 2020. Vol. 13, № 23. P. 5380. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13235380>

43. Facile preparation and property analyses of L-CNC/SiO₂-based composite superhydrophobic coating / W. Huang et al. *Frontiers of materials science*. 2022. Vol. 16, № 4. URL: <https://doi.org/10.1007/s11706-022-0626-4>
44. Construction of cnc@siO₂@pl based superhydrophobic wood with excellent abrasion resistance based on nanoindentation analysis and good UV resistance / Z. Zhang et al. *Polymers*. 2023. Vol. 15, № 4. P. 933. URL: <https://doi.org/10.3390/polym15040933>
45. Green and abrasion-resistant superhydrophobic coatings constructed with tung oil/carnauba wax/silica for wood surface / J. Su et al. *Materials*. 2024. Vol. 17, № 12. P. 3000. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17123000>
46. PFAS-free superhydrophobic chitosan coating for fabrics / I. Tagliaro et al. *Carbohydrate polymers*. 2024. Vol. 333. P. 121981. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121981>

Soldatenkov V Yu., Melnyk L.I. BIOFILLERS AS A TOOL FOR FORMING HIERARCHICAL ROUGHNESS IN SUPERHYDROPHOBIC COATINGS

This article reviews current approaches to the use of biofillers for the development of superhydrophobic coatings. The relevance of this topic is driven by the urgent need for environmentally friendly surfaces that simultaneously exhibit strong water repellency and retain their functional properties under real operating conditions.

It is shown that a true superhydrophobic effect arises not only from low surface energy, but primarily from multilevel micro- and nanoroughness, which stabilizes the Cassie–Baxter wetting regime. At the same time, the practical application of such coatings is still limited by several serious challenges, including insufficient mechanical strength of the surface relief, sensitivity to external and significant fragmentation of the literature data concerning methods for evaluating their service life.

The aim of this work was to systematize biofillers used in superhydrophobic coatings. The main focus is placed on their morphology, modification methods, scenarios of incorporation into the polymer matrix, and their influence on coating durability. Polysaccharide-based biofillers and their nanofoms, lignin particles, natural waxes, agricultural biofillers, biocarbon materials, and biogenic silica phases are considered.

It is substantiated that, for the analysis of these materials, the most convenient approach is to classify them not only by chemical nature but also by morphology, since it is precisely the shape and structure of the particles that determine how the hierarchical surface relief is formed and how reliably the filler is anchored in the matrix.

It is shown that surface modification is a key stage in the development of truly functional superhydrophobic systems. It simultaneously reduces surface energy, improves compatibility with the film-forming component, and stabilizes the dispersion. Particular attention is paid to the comparison of the two main scenarios for incorporating biofillers: bulk incorporation into the composition and near-surface structuring. It was found that bulk incorporation promotes the formation of a stronger composite framework and significantly improves the mechanical stability of the coating, whereas near-surface structuring provides much better initial wetting characteristics but proves to be more vulnerable to abrasive wear.

Approaches to the evaluation of the durability of superhydrophobic coatings are systematized, and a minimal yet sufficient set of indicators is proposed for the correct comparison of results reported in different studies. This set includes the static water contact angle, sliding angle, contact angle hysteresis, parameterized abrasion tests, assessment of resistance to wetting/drying cycles, UV and chemical exposure, as well as morphological analysis of the surface before and after loading.

In summary, the effectiveness of biofillers depends on a whole set of factors, including particle morphology, modification method, scenario of integration into the matrix, film-formation conditions, and the stability of the resulting surface architecture.

Keywords: biofillers, superhydrophobic coatings, hierarchical roughness, surface modification, polymer matrix, near-surface structuring, durability, water contact angle, sliding angle, abrasion resistance.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Солод М.І.

<https://orcid.org/0009-0006-1478-9382>

Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ ПОВІТРЯ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВО-АНТРОПОГЕННИХ ВПЛИВІВ

У даній роботі розглянуто досвід Європейського Союзу стосовно дослідження повітряних мас на території ЄС, причин проникнення забруднювачів до повітряних ресурсів на територіях військових конфліктів, а також виконано порівняльні дослідження зразків повітря з територій України, що знаходяться неподалік території військових дій, та тих, які короткий час перебували під окупацією. Забруднення повітря внаслідок військових дій є катастрофічним, спричиняючи викиди мільйонів тон парникових газів та токсичних речовин. Основними джерелами є вибухи, пожежі на нафтобазах та промислових зонах, а також масове використання генераторів. Повітря забруднюється важкими металами та сажею, що має довгострокові наслідки для здоров'я населення. Саме забруднення повітря, спричинене військовою діяльністю, під час тестування апаратного забезпечення, сучасних систем озброєння, а також під час військових операцій, що включають інтенсивні бомбардування, потребує серйозного розгляду, щоб уникнути поступового деградування навколишнього середовища, зокрема якості повітря, що призводить до небезпеки для здоров'я та життя цивільного населення. В Україні під час війни можливо проводити такі дослідження лише поблизу районів активних бойових дій при відповідних напрямках вітру. Було проведено відбір проб повітря в місцевостях Харківської, Дніпропетровської та Київської областей, проведено їх дослідження в лабораторних умовах. Визначено незначне підвищення вмісту аерозолів, діоксиду азоту, оксиду вуглецю та оксиду сірки у деяких пробах областей, наближених до лінії бойових дій при напрямку вітру зі сходу та північного сходу, порівняно із пробами, відібраними у Київській області, в яких підвищення показників не спостерігалось. Екстраполюючи отримані дані, можна також припустити, що при наближенні до територій інтенсивних бойових дій концентрація небезпечних речовин в повітрі буде збільшуватись.

Ключові слова: військова діяльність, забруднення повітря, деградування навколишнього середовища, небезпека для здоров'я населення, порівняльні дослідження повітря.

Постановка проблеми. Забруднення повітря має стосуватися кожної людини. Аристотель вважав повітря одним із п'яти важливих елементів необхідних для життя на планеті. Протягом багатьох років відбулася серія конференцій на тему забруднення навколишнього середовища і, зокрема, забруднення повітря, стурбованих насамперед необхідністю офіційного контролю. Нещодавно завершилася Конференція ООН з навколишнього середовища людини, де забруднення повітря було визнано важливою темою [1]. Домовленості, досягнуті на кожній конференції, фіксуються у деклараціях. Однак, у декларації Стокгольмської конференції 1972 року не згадувалося про актуальність війни для забруднення навколишнього середовища, хоча в Принципі 6 є посилання на «... виділення тепла у такій кількості або концентрації, яка перевищить ємність навколишнього середовища...» [9, с.95].

У декларації Конференції в Ріо-де-Жанейро 1992 року в Принципі 24 згадувалося про війну

яка за своєю суттю є руйнівною для сталого розвитку і що держави, таким чином, повинні поважати міжнародне право, забезпечуючи захист навколишнього середовища під час збройного конфлікту [9]. Схоже, що занепокоєння щодо ситуації у середовищі внаслідок військових дій існує давно, хоча без конкретизації та планів, але немає ефективних дій. Необхідно створити документ, який би включав тему, якою, здається, часто нехтують, а саме, тему внеску військової діяльності в забруднення повітря, і, зокрема, значення виділення великої кількості тепла в атмосфері.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом історії, особливо під час збройних конфліктів, військові дії негативно впливали на навколишнє середовище. Застосування вибухових та хімічних речовин створює багатофакторну небезпеку через виділення в повітря мікрочасток та надмірного тепла, завдає великої екологічної шкоди і ставить під загрозу здоров'я населення. Повітряні маси здатні переносити аерозолі та



смог, що містять отруйні речовини, та посилюють вже існуючу вразливість середовища. Отже, вплив військових дій на повітряні маси ставить під загрозу середовище та цивільне населення не лише в місці безпосереднього застосування зброї, але й на значній відстані від нього. Над дослідженням проблеми в історичному та сучасному аспектах працювали, зокрема, такі організації, як Всесвітня організація охорони здоров'я, Європейська агенція довкілля, світові науковці Н. Гіслоп, А. Горн, К. Дасгупта, Дж. Х. Зайнфілд, Р. Дж. Леві, Л. Мюррей, Д. Печевські, С. Пандіс, К. Протопсалтіс, Г. Хантрізер, К. Холман, Ю. Шуманн тощо, та українські науковці Ю. Байлюк, О. Бондар, Л. Воловик, Л. Горошкова, О. Наумовська, О. Рибалова, М. Сорока, І. Хондак, А. Чугай та інші досліджували важливість оцінювання впливу забруднень повітря внаслідок військових дій. Однак, європейські країни мають значний досвід у дослідженнях забруднень повітря та їхніх впливів на здоров'я громадян, отже варто його розглянути та дослідити як зразки повітря із звільнених територій та з областей, наближених до бойових дій, так і можливості застосування таких досліджень після звільнення територій України від окупації.

Постановка завдання. Мета дослідження – проаналізувати досвід Європейського Союзу стосовно досліджень впливу забруднень повітря внаслідок військових дій та здійснити аналіз повітря в регіонах України, звільнених від окупації та наближених до військових дій.

Виклад основного матеріалу. Вплив воєнної діяльності на навколишнє середовище, зокрема на забруднення повітря, починається з розробки та випробувань усіх аспектів, пов'язаних із військовою зброєю, технікою та озброєнням, а також необхідної підготовки щодо її використання. Між 1945 і 2009 роками ряд країн взялися за розробку ядерної зброї. Це включало понад 2000 випробувань протягом 64 років, і не можна сумніватися, що на якість повітря сильно вплинули як хімічні речовини, які викидалися в атмосферу, так і, що більш важливо, тепло, яке було додано до системи планети і повинно було вплинути на течії природного повітря над суходолом та морем, а також вплинуло на флору та фауну планети і на людей [2, с.126]. Артилерійські снаряди та бомби різного розміру, також хімічна зброя, постійно розробляються та випробовуються, ігноруючи обмеження, накладені на них міжнародною угодою для забезпечення захисту навколишнього середовища та якості повітря [9].

Планета Земля має довгу історію воєн, які вражають розвивалися протягом століть. У минулому воїн виходив з дому вранці, щоб піти воювати. Він знав, що якщо його не вб'ють або тяжко не поранять, він знову об'єднається зі своїми близь-

кими того ж вечора. Ситуація, однак, змінювалася з роками, деякі війни тривали десятиліттями. Інструменти війни постійно змінюються, переживаючи етапи розвитку, хоча тло воєн не змінилося.

Воїн минулого залежав від лісу для заготівлі деревини для виготовлення луків і стріл. Ліс ніс основний тягар війни, з дуже незначним впливом на якість повітря в навколишньому середовищі, хоча вогонь зрештою був доданий до арсеналу зброї, і це, мабуть, вплинуло на навколишнє середовище того часу. Безсумнівно, наслідки пожежі, спричинені природними явищами, такими як удари блискавки та виверження вулканів, були тоді більш вагомими [3].

Сьогодні війна зовсім інша. Зброя різноманітна та універсальна та може мати багаторазовий вплив, особливо на навколишнє середовище та якість повітря, яким дихають люди, до, під час і після кожної такої події, окрім знищення життя супротивників. Зараз можна спостерігати за військовими діями, слідкувати як вони відбуваються, хоча дуже мало, якщо взагалі, під час подій говорять про очікуваний вплив на тих людей, які перебувають на території військових операцій, а саме, цивільне населення, яке в майбутньому постраждає від спричиненого військовими подіями забруднення повітря [9].

Коли стріляє куля, людина відчуває шум і стає свідком можливого удару. Однак ця куля, швидше за все, викине в атмосферу крихітні частинки металу, включаючи, наприклад, свинець. Ці частинки дуже легкі і можуть в кінцевому підсумку осісти на будь-якій поверхні або можуть перенестись з повітрям, з яким вони змішалися, і стати постійним компонентом повітряної маси. У сучасній війні кулі вистрілюють мільйонами, отже їхній вплив на якість повітря є дуже серйозним. Далі за масштабом, вибухають ручні гранати, маленькі бомби, касетні бомби, великі бомби та ракети, які неодмінно додають небажані хімічні елементи у повітря [5, 8].

Забруднювачі повітря можна загалом розділити на дві категорії залежно від джерела: первинні забруднювачі повітря та вторинні забруднювачі повітря. Первинні забруднювачі повітря – це забруднювачі повітря, які безпосередньо потрапляють в атмосферу з таких джерел, як заводи, автомобілі тощо. Приклади включають чадний газ (CO), вуглекислий газ (CO₂), метан (CH₄), леткі органічні сполуки (ЛОС), аміак (NH₃), і діоксид сірки (SO₂), і оксид азоту (NO). Вторинні забруднювачі повітря – це забруднювачі повітря, які утворюються в атмосфері за допомогою серії хімічних реакцій. Приклади включають дисперсні частинки (ДЧ), озон (O₃), азотну кислоту (HNO₃), сульфат (SO₄²⁻), сірчану кислоту (H₂SO₄). Забруднювачі, такі як ДЧ і діоксид азоту (NO₂), є як первинними, так і вторинними забруднювачами [4].

Оксид вуглецю – це збірна назва сполук вуглецю з киснем, найчастіше стосується смертельно небезпечного, безбарвного чадного газу (CO). CO повільно реагує з навколишнім повітрям з іншими хімічними сполуками, і залишається в атмосфері протягом тривалого часу, від 0,1 до 5 років [6].

NO_x – це група сполук, яка є токсичною, подразнювальною та високореакційною з іншими молекулами, які існують в атмосфері. Оксид азоту (NO) і діоксид азоту (NO_2) складають сімейство NO_x ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$). NO та NO_2 обертаються між собою, коли озон присутній протягом хвилини через хімічну реакцію протягом дня. Наприклад, NO реагує на O_3 , який створює NO_2 . NO_2 зазвичай використовується як індикатор NO_x , оскільки він викликає більше ускладнень для здоров'я, ніж NO. NO безбарвний, а діоксид азоту NO_2 – це токсичний червоно-бурий газ із задушливим запахом, що утворюється при згорянні палива, подразнює дихальні шляхи та викликає набряк легень. У великих концентраціях стає сильною неорганічною отрутою [7, 15].

Утворення O_3 тягне за собою розпад NO_2 за допомогою ультрафіолетового світла, що дає NO та атом кисню (O). O_3 утворюється після реакції атома кисню з атмосферним киснем (O_2). Час життя NO_x коливається від годин до днів, і його час життя залежить від концентрації гідроксильного радикалу (OH) і швидкості фотолізу, оскільки утворення азотної кислоти (HNO_3) через реакцію OH з NO_2 є найпоширенішим механізмом видалення NO_x в атмосфері.

NO_x переважно походять з антропогенних джерел і викидаються під час високотемпературного спалювання та, відповідно, мають вплив на екосистему. NO_x може перетворюватися на нітратні аерозолі в атмосфері за допомогою серії хімічних реакцій. Такий нітратний аерозоль збільшує поглинання аерозолем води та здатність аерозолу розсіювати світло, що створює туман, закриваючи чіткий вид на небо [12, с.16]. NO_x є основним інгредієнтом фотохімічного смогу з ЛОС і сонячним світлом, що також знижує добробут людей. Як тільки NO_x викидається в атмосферу, він легко реагує з водою з утворенням азотної кислоти. Азотна кислота може змішуватися з водою та снігом у кислотний дощ для осадження. Трансформація NO_x у нітрат може викликати надмірне збагачення поживними речовинами у водному середовищі, яке відоме як «евтрофікація» [10, с.3850]. Коли надлишок поживних речовин доступний у водній системі, це викликає цвітіння рослин і водоростей і гіпоксію (тобто виснаження кисню), створюючи несприятливі умови життя для морських тварин.

Дисперсні частинки можуть утворювати такі атмосферні явища, як аерозолі, а саме, крихітні частинки, дисперговані/суспендовані в газопо-

дібному середовищі. Аерозольна частинка може складатися з однієї безперервної одиниці твердої або рідкої речовини, що містить багато молекул, що утримуються разом міжмолекулярними силами та є переважно більшими за молекулярні розміри ($>0,001 \mu\text{m}$); частинка також може складатися з двох або більше таких одиничних структур, що утримуються разом міжчастинковими адгезивними силами, тож вона поводить себе як одна одиниця в суспензії або на осаді. Серпанок – це аерозоль, який зменшує видимість і може складатися з комбінації крапель води, забруднюючих речовин і пилу; діаметр частинок менше $1 \mu\text{m}$ [11].

Термін «смог» походить від слів «дим» (англ. – smoke) та «туман» (англ. – fog) і застосовується до значного забруднення аерозолями; в сучасних умовах використовується вільно стосовно будь-якого забруднення повітря.

Оксиди сірки – це бінарні сполуки сірки з киснем, основними з яких є діоксид (SO_2 , сірчистий газ) та триоксид (SO_3 , сірчаний ангідрид). SO_2 – токсичний, безбарвний газ із різким запахом, що використовується як консервант E220 у харчовій промисловості та при виробництві сульфатної кислоти, у високих концентраціях токсичний, викликає кашель, задуху та алергічні реакції. Є причиною утворення кислотних дощів [14].

SO_3 – це летка рідина, що утворюється при окисненні SO_2 і реагує з водою з утворенням сульфатної кислоти. Оксиди сірки є небезпечними забруднювачами атмосфери, що утворюються переважно при згорянні мінерального палива та вулканічної діяльності [13].

В Україні під час війни можливо проводити такі дослідження лише поблизу районів активних бойових дій при відповідних напрямках вітру. Було проведено відбір проб повітря в місцевостях Харківської, Дніпропетровської та Київської областей, проведено їх дослідження в лабораторних умовах. Визначено незначне підвищення вмісту аерозолів, діоксиду азоту, оксиду вуглецю та оксиду сірки у деяких пробах областей, наближених до лінії бойових дій при напрямку вітру зі сходу та північного сходу, порівняно із пробами, відібраними у Київській області, в яких підвищення показників не спостерігалось. Результати досліджень представлені в таблицях.

Висновки. У результаті проведених досліджень було виявлено, що повітря на територіях, розташованих неподалік активних бойових дій, зазнало суттєвих забруднень, зокрема аерозолями та діоксидом азоту при відповідних напрямках вітру. Населення цих територій потребує уваги щодо відновлення їхнього здоров'я. На інших досліджених ділянках суттєвого забруднення повітря, що перевищує рівень ГДК, не виявлено.

Таблиця 1

Результати аналізу забруднень повітря у Харківській області

Місце відбору проби повітря		Харківська обл., Юліївське відділення з переробки газу	
Дата і час відбору		10.07.2025, 11.10-11.30	
Точка відбору проб		На висоті 1,5 м від поверхні землі	
Напрямок вітру		Північно-східний	
Швидкість вітру, м/сек		4,2	
Засоби вимірювання		Газоаналізатор "Аквілон", Електроаспіратор «АSА-2М»	
Назва досліджуваної речовини, інгредієнта	Результат дослідження концентрації в одиницях виміру		НТД на методи дослідження
	Виявлена	ГДК	
Недиферинційований за складом пил (Аерозоль)	0,86	0,5	РД 52.04.186-89
	0,78		
	0,66		
	0,77		
	0,69		
	0,77		
Середнє значення	0,77	0,5	РД 52.04.186-89
Азоту діоксид	0,407		
	0,603		
	0,495		
	0,498		
	0,596		
Середнє значення	0,540	5,0	РД 52.04.186-89
Вуглецю оксид	3,131		
	2,972		
	3,117		
	2,947		
	2,855		
Середнє значення	3,004		
Оксид сірки	0,062	0,085	РД 52.04.186-89
	0,088		
	0,095		
	0,053		
	0,089		
Середнє значення	0,088		

Таблиця 2

Результати аналізу забруднень повітря у Дніпропетровській області

Місце відбору проби повітря		Дніпропетровська обл., м. Жовті Води, вул. Героїв України, 4	
Дата і час відбору		18.09.2025, 13.10-13.30	
Точка відбору проб		На висоті 1,5 м від поверхні землі	
Напрямок вітру		Південно-східний	
Швидкість вітру, м/сек		5,3	
Засоби вимірювання		Газоаналізатор "Аквілон", Електроаспіратор «АSА-2М», Аспіратор «Тайфун Р-20-2»	
Назва досліджуваної речовини, інгредієнта	Результат дослідження концентрації в одиницях виміру		НТД на методи дослідження
	Виявлена	ГДК	
Недиферинційований за складом пил (Аерозоль)	0,76	0,5	РД 52.04.186-89
	0,72		
	0,68		
	0,70		
	0,71		
	0,71		
Середнє значення	0,71		

Продовження таблиці 2

Азоту діоксид	0,402	0,5	РД 52.04.186-89
	0,405		
	0,395		
	0,395		
	0,397		
Середнє значення	0,399	5,0	РД 52.04.186-89
Вуглецю оксид	3,211		
	3,187		
	3,190		
	3,222		
	3,210	0,085	РД 52.04.186-89
Середнє значення	3,204		
Оксид сірки	0,082		
	0,098		
	0,085		
	0,084		
	0,097		
Середнє значення	0,095		

Таблиця 3

Результати аналізу забруднень повітря у Київській області

Місце відбору проби повітря	Київська обл., Бучанський р-н, с. Ворзель, вул. Лісова, 73		
Дата і час відбору	18.11.2025, 13.10-13.30		
Точка відбору проб	На висоті 1,5 м від поверхні землі		
Напрямок вітру	Північно-Східний		
Швидкість вітру, м/сек	6,0		
Засоби вимірювання	Газоаналізатор "Аквілон", Електроаспіратор «АSА-2М», Аспіратор «Тайфун Р-20-2»		
Назва досліджуваної речовини, інгредієнта	Результат дослідження концентрації в одиницях виміру		НТД на методи дослідження
	Виявлена	ГДК	
Недиферинційований за складом пил (Аерозоль)	0,46	0,5	РД 52.04.186-89
	0,45		
	0,47		
	0,43		
	0,44		
Середнє значення	0,45	0,5	РД 52.04.186-89
Азоту діоксид	0,402		
	0,405		
	0,395		
	0,395		
	0,397	5,0	РД 52.04.186-89
Середнє значення	0,399		
Вуглецю оксид	3,210		
	3,185		
	3,190		
	3,220		
	3,211	0,085	РД 52.04.186-89
Середнє значення	3,203		
Оксид сірки	0,042		
	0,048		
	0,045		
	0,044		
	0,047		
Середнє значення	0,045		

Список літератури:

1. EEA. Sources and emissions of air pollutants in Europe. 2022. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/sources-and-emissions-of-air>
2. Holman C. Sources of air pollution. *Air pollution and health* / Ed. by R. L. Maynard et. al. Academic Press, 1999. P.115-148.
3. Horn A. S., Dasgupta K. P. The Air Quality Index (AQI) in historical and analytical perspective. Tutorial review. University of Texas: Arlington, 2024. 53 p.
4. Hyslop N. P. Impaired Visibility: The Air Pollution People See. *Atmospheric Environment*. 2009. №43. Pp.182–195. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.067
5. IOM. Ukraine: IDP Estimates to 25 November 2022 [dataset]. Humanitarian Data Exchange, 2022. URL: <https://data.humdata.org/dataset/ukraine-idp-estimates>
6. Levy R. J. Carbon Monoxide Pollution and Neurodevelopment: A Public Health Concern. *Neurotoxicology and Teratology*. 2015. №49. Pp.31–40. DOI: 10.1016/j.ntt.2015.03.001
7. Murray L. T. Lightning NO_x and Impacts on Air Quality. *Current Pollution Reports*. 2016. № 2(2). P.115–133. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0031-7>.
8. Pechevski D. The impacts of Ukraine's energy sector on air quality. CEE Bankwatch Network, 2020. URL: https://bankwatch.org/wp-content/uploads/2020/10/2020-10-19_Ukraine-air-quality-mapping_final2.pdf
9. Protosaltis C. Air pollution caused by war activity. *WIT Transactions on Ecology and The Environment: Air Pollution XX*. 2012. №157. Pp. 93–98. WIT Press: Southampton, UK. <https://doi.org/10.2495/AIR120091>
10. Schumann U., Huntrieser H. The global lightning-induced nitrogen oxides source. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007. №7. Pp.3823–3907, <https://doi.org/10.5194/acp-7-3823-2007>.
11. Seinfeld J. H., Pandis S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, 2016. 1152 p.
12. *Volatile Organic Compounds in the Atmosphere* / Ed. by R. Koppman. Germany: University of Wuppertal, 2008. 30 p.
13. WHO. Air Quality Guidelines – Global Update 2005. WHO: Geneva, Switzerland, 2005. 496 p.
14. WHO. Ambient air pollution: Health impacts. WHO: Geneva, Switzerland, 2018. URL: <https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/en/>
15. WHO. Air Pollution. World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2020. URL: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1

Solod M.I. THE RESEARCH ON AIR POLLUTION DUE TO MILITARY-ANTHROPOGENIC INFLUENCES

This work examines the experience of the European Union regarding the study of air masses on the territory of the EU, the reasons for the penetration of pollutants into air resources in the territories of military conflicts, and also performs comparative studies of air samples from the territories of Ukraine located near the territory of military operations and those having been under occupation for a short time. Air pollution caused by military operations is catastrophic due to the emission of millions of tons of greenhouse gases and toxic substances. The main sources of it are explosions, fires at oil depots and industrial zones, as well as the mass use of generators. The air is polluted by heavy metals and soot, which has long-term consequences for public health. It is air pollution caused by military activities that, when testing hardware, modern weapons systems, as well as during military operations involving intensive bombing, needs serious consideration in order to avoid the gradual degradation of the environment, in particular, air quality, leading to threats to the health and life of the civilian population. In Ukraine during the war, it is possible to conduct such research only near areas of active hostilities at the appropriate wind directions. Air sampling was carried out in the areas of Kharkiv, Dnipropetrovsk and Kyiv regions, and their investigations were carried out under laboratory conditions. A slight increase in the content of aerosols, nitrogen dioxide, carbon monoxide and sulfur oxide was determined in some samples of areas close to the line of hostilities at the direction of the wind from the East and North-East, compared to samples taken in the Kyiv region, in which no increase in indicators was observed. Extrapolating from the obtained data, it can also be assumed that when approaching the territories of intensive hostilities, the concentration of dangerous substances in the air will increase.

Keywords: military activities, air pollution, environmental degradation, public health hazards, comparative air research.

Дата першого надходження статті до видання: 12.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Циганенко В.П.

<https://orcid.org/0009-0004-8707-4447>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Трофімов І.Л.

<https://orcid.org/0000-0001-5539-1166>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Рогальський С.П.

<https://orcid.org/0000-0002-5200-5247>

Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії імені В.П. Кухаря
Національної академії наук України

ВПЛИВ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХІМІЧНИХ ДОБАВОК НА ПРОТИЗНОШУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ І МОТОРНИХ ОЛИВ

У статті обговорюється питання протизношувальних властивостей дизельних палив та мінеральної моторної оливи. Основною метою роботи були експериментальні дослідження щодо впливу іонних рідин на зміну протизношувальних властивостей традиційних дизельних палив. Також мета полягала у дослідженні впливу іонних рідин на протизношувальні властивості мінеральної моторної оливи. Було проведено експериментальні дослідження, різними методами, щодо зміни протизношувальних властивостей традиційних дизельних палив шляхом додавання іонних рідин. Результати досліджень вказують на найбільшу ефективність імідазолієвих іонних рідин, зокрема $C_{12}C_1IM$ -ДБС, для покращення протизношувальних властивостей дизельних палив. Плівка утворюється завдяки електростатичній взаємодії полярних груп іонних рідин з поверхнею металу, а також внаслідок міжмолекулярного впорядкування довгих алкільних ланцюгів.

Водночас результати проведених досліджень показали, що більшість зразків дизельних палив, модифікованих іонними рідинами мають гірші протизношувальні властивості порівняно з традиційним дизельним паливом. Це може бути зумовлено як низькою концентрацією іонних рідин у дизельному паливі, так і недостатньою взаємною сумісністю окремих сполук з вуглеводневим паливом. Одержані результати досліджень мають позитивний науковий ефект, оскільки дозволили виявити зразок – $C_{12}C_1IM$ -ДБС, який проявив найкращі показники серед досліджених іонних рідин і може стати основою для розробки ефективних протизношувальних присадок нового покоління. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію концентрації даної сполуки, модифікацію її структури та оцінку впливу температурних і навантажувальних факторів на формування захисної плівки у зоні тертя.

Дослідження показали, що додавання іонних рідин до дизельних палив впливає на характер тертя та інтенсивність зношування поверхонь металу. Одержані результати свідчать про необхідність подальшої оптимізації складу і концентрації іонних рідин для їх використання у дизельному паливі.

При цьому, проведені дослідження показали, що модифікація мінеральної моторної оливи $M10G2k$ іонними рідинами впливає на інтенсивність зношування сталі ШХ15. Найменш ефективним виявилась іонна рідина C_8C_8Rug -ДБС, а найбільш ефективним виявилось додавання $MBT-C_{12}$, яка утворює рівномірну та стійку трибоплівку. Загалом, присадки з вираженою хемосорбцією та довгими алкільними ланцюгами забезпечують найбільш стійкий протизношувальний ефект.

Ключові слова: протизношувальні властивості, дизельне паливо, моторна олива, іонні рідини, тертя, зношування.

Постановка проблеми. Під час експлуатації дизельної техніки можливі відмови окремих систем через збільшення зношення компонентів. Загальний досвід щодо надійності паливних систем як вітчизняних, так і закордонних дизельних

двигунів показує, що близько 50% відмов відбуваються через погіршення експлуатаційних властивостей дизельних палив [1].

Покращення довговічності, надійності та економічності дизельних двигунів є складним

завданням. Однією з ключових умов забезпечення надійності та довговічності є вдосконалення експлуатаційних властивостей дизельного палива.

Протизношувальні властивості палив для дизельних двигунів впливають на їхню надійність та довговічність, особливо стосовно пар тертя. Ці пари тертя функціонують у режимах кочіння, ковзання та комбінованого тертя за різноманітних навантажень, температур, тиску та швидкостей руху в умовах рідкого і граничного змащування. Властивості змащення пального мають значущу роль і залежать від їх хімічного складу, в'язкості, термоокислювальної стабільності, наявності механічних домішок і поверхнево-активних речовин [2].

Моделювання умов експлуатації двигунів внутрішнього згоряння є важливим етапом у трибологічних дослідженнях матеріалів, що використовуються в їхній конструкції. Двигуни, які реалізовані за традиційною схемою, мають циліндр та поршень, який виконує зворотно-поступальні рухи під впливом тиску газів. Для відтворення була розроблена модель, яка імітує принцип роботи поршневої групи шляхом формування вузла тертя «палець – площа». Зазначена схема дозволяє відтворити основні закономірності контактної взаємодії, забезпечити повторюваність досліду, провести точні вимірювання зношування поверхонь та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні існує досвід використання екологічно безпечних іонних рідин на базі рицинолевої кислоти в ролі емульгаторів для створення стабільних мікроемульсій дизельного пального з етанолом. Ці системи виявилися стабільними і не розшаровувалися навіть після року зберігання. Фізико-хімічні властивості мікроемульсій відповідали стандарту ASTM D975: густина, в'язкість і температурні характеристики були подібні чистому дизелю, а також спостерігалось покращення температури спалаху, температури застигання, зниження кислотного числа. Використання іонних рідин, на основі касторової олії, дозволило отримати стабільні та екологічні паливні суміші.

Досвід використання діамонійних іонних рідин як емульгаторів для створення стабільних мікроемульсій дизельного палива, відпрацьованої кулінарної олії та етанолу показує подібні результати. Характеристики отриманого сумішевого пального відповідали стандартам ASTM D975 [3], зокрема, за показниками цетанового числа, теплоти згорання, в'язкості, густини та температури спалаху.

Розроблені паливні зразки потребують меншої кількості повітря для згорання в порівнянні з чистим дизельним паливом, що призводить до зменшення викидів забруднюючих речовин. Мікроемульсії демонстрували високу стабільність на протязі тривалого часу [4, 5].

Іншим перспективним напрямом є застосування іонних рідин $[C_{10}H_{19}N_2]^+[C_2F_6NO_4S_2]^-$. Вони формують захисний шар на поверхні сталі типу С. Експерименти довели їх високу антикорозійну ефективність на сталі, яка становить близько 99 %, завдяки сильним адсорбційним властивостям та антиоксидантній активності [6].

Металоорганічні каркаси на основі молібдену використовували у якості додатків до синтетичної оливи ПАО10, при цьому іонна рідина (тетраметилдодецилдіізононілфосфат) була використана як диспергатор. Іонна рідина має диспергуючу роль та більше збагачує змащувальні фосфати на межі розділу. Зазначені оксиди та фосфати разом утворюють трибоплівку, що має низьку силу зсуву і захист тертя на межі розділу [7].

На основі попередніх результатів можна прогнозувати, що додавання іонних рідин до складу дизельного палива сприятиме покращенню його змащувальних характеристик і протизношувальних властивостей. Такий підхід є актуальним у контексті сучасних екологічних вимог. Однак вилучення сірковмісних сполук стало причиною погіршення його протизношувальних характеристик і збільшення ризику пошкодження паливної системи. У такому разі іонні рідини розглядаються як перспективні присадки, здатні компенсувати втрату змащувальної здатності малосірчаного дизельного палива.

Постановка завдання. Метою роботи є експериментальні дослідження щодо впливу іонних рідин та органічних сполук на зміну протизношувальних властивостей традиційних дизельних палив та мінеральної моторної оливи. Експериментальні дослідження було проведено різними методами для оцінки зміни протизношувальних властивостей шляхом додавання іонних рідин.

Виклад основного матеріалу. Протизношувальні властивості дизельного палива відіграють ключову роль у забезпеченні надійної та довговічної роботи дизельних двигунів. Недостатня змащувальна здатність палива може призвести до підвищеного зносу компонентів паливної системи, таких як паливні насоси та форсунки, що, у свою чергу, збільшує витрати на обслуговування та ремонт.

У дослідженнях використовували дизельне паливо нафтового походження марки «Л», придбане на АЗС „ОККО“. Якість дизельного палива відповідає вимогам ДСТУ 7688:2015 Паливо дизельне Євро. Технічні умови [8]. Також дослідження проводилися з мінеральною моторною оливою М10Г2к, яка в товарному виді не містить пакету присадок.

Для модифікації дизельного палива були розроблені нові гетероциклічні сполуки та іонні рідини, які були використані у проведених дослідженнях:

- 2-додецилмеркаптобензотіазол (МВТ-С₁₂);
- N-додеканоїлморфолін (Mor-LA);
- N-децилоксикарбонілметилморфолін (Mor-CH₂COOC₁₀);
- 1-додецил-3-метилімідазолій додецилбензолсульфонат (C₁₂C₁ІМ-ДБС);
- 1,3-діоктилімідазолій додецилбензолсульфонат (C₈C₈ІМ-ДБС);
- 1-додецилпіридиній додецилбензолсульфонат (PyrC₁₂-ДБС).

Синтезовано нові модифікуючі добавки до мастильних матеріалів, які належать до класу онієвих солей. Завдяки низьким температурам топлення такі сполуки мають популярну назву «іонні рідини». Вони включають об'ємні органічні катіони 1-додецилпіридинію, 1-додецил-3-метилімідазолію, 1,3-діалкілімідазолію та аніон додецилбензолсульфонат. Присутність у складі іонних рідин гетероциклічних катіонів з довгими вуглеводневими замісниками надає їм широкого спектру антимікробної активності, а також високої адсорбційної активності відносно металевих поверхонь. Крім того, сполуки можуть проявляти антиоксидантні властивості. Аніон додецилбензолсульфонат надає іонним рідинам гідрофобних властивостей, а також розчинності в органічних розчинниках (в тому числі вуглеводневих). Серед досліджених зразків до іонних рідин належать сполуки C₁₂C₁ІМ-ДБС, C₈C₈ІМ-ДБС та PyrC₁₂-ДБС, а МВТ-С₁₂, Mor-LA та Mor-CH₂COOC₁₀ належать до органічних гетероциклічних сполук.

МВТ-С₁₂ – це органічна сполука, яка має бензотіазольне кільце (ароматичний цикл із атомами сірки та азоту) з тіольною (–SH) функціональною групою та довгим додециловим алкільним ланцюгом (C₁₂). Бензотіазольне кільце з атомами S і N забезпечує полярність і здатність до адсорбції на металічних поверхнях. Алкільний ланцюг надає гідрофобність і добре розчинна у вуглеводневих середовищах, зокрема у дизельному паливі.

Mor-LA – це органічна сполука, що має у своїй структурі морфолінове кільце (амін + ефірна

функція) і довгий алкільний ланцюг (C₁₂), що робить молекулу амфіфільною з частково полярною та частково неполярною частинами. Mor-LA добре розчинна у неполярних розчинниках завдяки алкільному ланцюгу; з помірною полярністю через морфолінове кільце.

N-децилоксикарбонілметилморфолін (Mor-CH₂COOC₁₀) – це органічна сполука, яка містить морфолінове кільце з приєднаним метиленовим фрагментом, що через карбонільну групу зв'язаний з довгим C₁₀-децильним алкільним радикалом. Дна сполука може взаємодіяти як із полярними, так і з неполярними середовищами.

1-додецил-3-метилімідазолій додецилбензолсульфонат (C₁₂C₁ІМ-ДБС) є гідрофобною іонною рідиною.

Для дослідження стану поверхонь тертя і коефіцієнта тертя використали комплекс для аналізу трибологічних характеристик паливно-мастильних матеріалів. Експериментальні дослідження проводились за допомогою приладу, призначеного для вивчення поведінки поверхонь тертя в умовах постійних рівномірних і нерівномірних магнітних полів. У конструкцію входять два магніти, полюси яких можуть змінювати положення паралельно до диска з контртілом і робочим середовищем [9, 10]. Це забезпечує формування постійного рівномірного або нерівномірного магнітного поля, що впливає на робоче середовище.

Експериментальні дослідження були проведені за схемою тертя «палець–площина» матеріал зразків ШХ15 – сталь Ст45 (загартована до значення HRC 58), $\vartheta = 0,2$ м/с; P = 5 Н, $\nu = 1$ Гц. Розміри зразка: d = 4 мм, L = 33,5 мм.

Для проведення досліджень використовували традиційне дизельне паливо (ДП) і дизельне паливо модифіковане сполуками (ДП, ДП+МВТ-С₁₂, ДП+Mor-LA, ДП+Mor-CH₂COOC₁₀, ДП+C₁₂C₁ІМ-ДБС). Також, у якості робочої рідини застосовували мінеральну моторну оливу М10Г2к, яку модифікували додатково присадками МВТ-С₁₂, C₁₂C₁ІМ-ДБС, PyrC₁₂-ДБС та C₈C₈Pyr-ДБС. Модифікація палива змінювала його змащувальні та протизношувальні властивості, що дозволило оцінити вплив різних композицій на інтенсивність зношування сталі. Ступінь зношування зразків визначався шляхом профілографування площ зношування і розрахунку величини зношування згідно з методикою [11].

Для проведення дослідження матеріалів на тертя був використаний пристрій, описаний у [12]. Головна мета експерименту полягала у визначенні інтенсивності зношування пари тертя та триболо-

гічних характеристик загартованої сталі ШХ15 під впливом середовища дизельного палива, що було модифіковане іонними рідинами різного хімічного складу і структури.

Іонні рідини були розчинені в стандартному дизельному паливі з об'ємом кожного досліджуваного зразка в 50 мл. У таблиці 1 представлено склад і умовні позначення досліджених зразків дизельного палива.

Напрацювання на машині тертя проводились у середовищах згідно з даними таблиці 1.

Таблиця 1

Склад зразків дизельного палива, модифікованого іонними рідинами

№	Умовне позначення	Склад зразка
1	ДП	Дизельне паливо (100 %)
2	ДП+С ₁₂ С ₁ ІМ-ДБС	Дизельне паливо (95 %) + 1-додецил-3-метил-імідазолій додецилбензосульфат (5 %)
3	ДП+МВТ-С ₁₂	Дизельне паливо (95 %) + 2-додецилмеркапто-бензотіазол (5 %)
4	ДП+Mor-LA	Дизельне паливо (95 %) + N-додеканоїлморфолін (5 %)
5	ДП+Mor-CH ₂ COOC ₁₀	Дизельне паливо (95 %) + N-децилоксикарбоніл-метилморфолін (5 %)

Для забезпечення точності вимірювань та об'єктивності отриманих результатів інтенсивності зносу пар тертя визначали в двох різних точках на поверхнях досліджуваних пар тертя. У таблиці 2 наведено результати вимірювань інтенсивності зношування пар тертя в точці 1 –

I₁, в точці 2 – I₂, а також середнє значення I_{ср} для двох вимірювань.

Таблиця 2

Результати оцінки інтенсивності зношування досліджуваних пар тертя, у середовищах зразків дизельних палив

Зразок	I ₁ , мкм ³ /км	I ₂ , мкм ³ /км	I _{ср} , мкм ³ /км
ДП	221569,01	318605,64	270087,33
ДП + С ₁₂ С ₁ ІМ-ДБС	531212,42	899149,16	715180,79
ДП + МВТ-С ₁₂	920860,59	1437943,49	1179402,04
ДП + Mor-LA	2520400,33	1926467,00	2223433,67
ДП + Mor-CH ₂ COOC ₁₀	670289,59	1101272,37	885780,98

На рис. 1 наведено узагальнені результати дослідження інтенсивності зношування сталі ШХ15 у середовищі досліджуваних зразків дизельних палив, модифікованих іонними рідинами по загартованій сталі Ст45 (твердість HRC 58).

Згідно з одержаними результатами, пара тертя у середовищі дизельного палива продемонструвала найнижчу інтенсивність зношування. У той же час пари тертя, які працювали у середовищах дизельного палива, модифікованого дадатками, мали вищу інтенсивність зношування. Найбільшу інтенсивність зношування показала пара тертя у середовищі дизельного палива, модифікованого N-додеканоїлморфоліном (Mor-LA). Аналіз результатів вказує на те, що пара тертя у середовищі традиційного дизельного палива, модифікованого С₁₂С₁ІМ-ДБС, продемонструвала вищу інтенсивність зношування поверхні за дизельне паливо.

Дизельне паливо, модифіковане С₁₂С₁ІМ-ДБС, знаходиться на поверхнях тертя, забезпечуючи

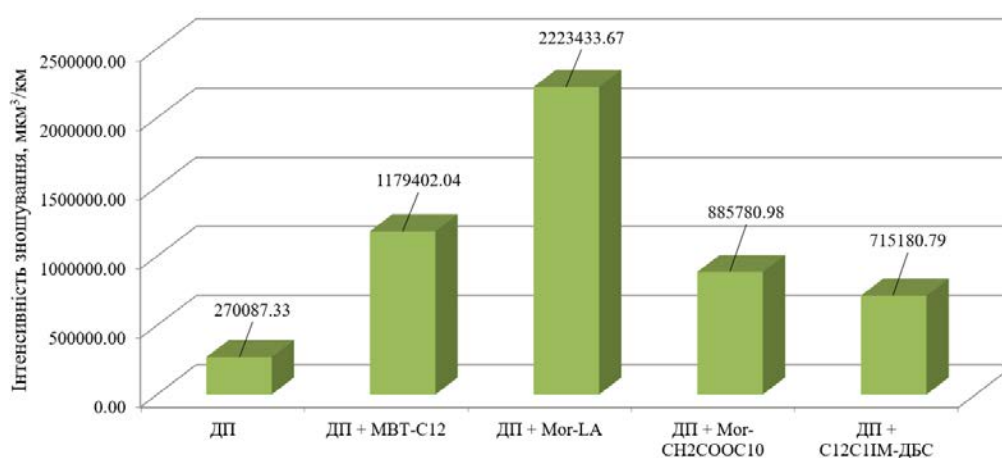


Рис. 1. Інтенсивність зношування пари тертя (I, мкм³/км) в середовищі дизельного палива, модифікованого іонними рідинами: ДП, ДП + МВТ-С₁₂, ДП + Mor-LA, ДП + Mor-CH₂COOC₁₀, ДП + С₁₂С₁ІМ-ДБС

адекватний рівень їх змочування. Така поведінка обумовлена молекулярною будовою 1-додецил-3-метил-імідазолій додецилбензосульфону. Зокрема, цьому сприяє поєднання імідазолієвого кільця з метильною групою і C_{12} -алкільним ланцюгом з одного боку, а також ароматичного кільця із сульфонатною групою і C_{12} -ланцюгом з іншого. Завдяки цьому сполука має гідрофобні властивості. Зазначена іонна рідина демонструє поверхнево-активні властивості, утворюючи міцелярні структури, які формують адсорбційні плівки на поверхні металів, сприяючи протизношувальному ефекту. При цьому помітно, що шар змащувальної плівки на поверхні тертя виявляється майже вдвічі тоншим у порівнянні з дизельним паливом, до якого не додавали іонних рідин. Таким чином, можна зробити висновок, що саме тонша змащувальна плівка є однією з причин підвищеного рівня зношення пар тертя під час їх дослідження.

З узагальнених результатів видно, що пара тертя, досліджена у середовищі традиційного дизельного палива, модифікованого $\text{Mor-CH}_2\text{COOC}_{10}$ продемонструвала схожу інтенсивність зношування поверхні, яка становила $I=885780,98 \text{ мкм}^3/\text{км}$ порівняно з попереднім зразком. Трибологічний аналіз параметрів поверхні вказує на утворення тонкої проміжної поверхневої плівки.

У дослідженнях трибологічних властивостей середовища дизельного палива, модифікованого 2-додецил-меркапто-бензотіазолом (МВТ-С_{12}), встановлено, що тертьова пара продемонструвала порівняно вищу інтенсивність зношування поверхні, яка становила $I=1179402,04 \text{ мкм}^3/\text{км}$, що аналогічно попереднім зразкам.

Плівка, утворена в процесі експлуатації на поверхні зразка сталі ШХ15, має виразні відмінності від попередніх досліджуваних зразків. На поверхнях пар тертя, описаних раніше, спостерігалася сітчаста структура, тоді як на цьому зразку виявлено зміни металевої поверхні, які характеризуються шаруватою, лускоподібною структурою. Крім того, за досягнення певної товщини поверхневої плівки було зафіксовано її відшарування.

На основі проведених спостережень можна зробити висновок, що під час взаємодії середовища палива з поверхнями тертя молекули 2-додецил-меркапто-бензотіазолу здатні проникати у поверхневий шар металу, утворюючи нові хімічні сполуки. Цей ефект, ймовірно, зумовлено наявністю бензотіазольного кільця в радикалі. Низька полярність цього кільця дозволяє утворення лише поверхневої плівки на металі, яка недостатньо

ефективно змащує поверхню та не формується у стійку плівку. Як наслідок, спостерігається відшарування цієї плівки, що призводить до більш інтенсивного зношування поверхонь тертя порівняно з іншими зразками. Це також підтверджується широким слідом доріжки, що є ознакою посиленого зношення. Трибологічні випробування у середовищі дизельного палива, модифікованого 2-N-додеканоїлморфоліном (Mor-LA), показали найвищу інтенсивність зношування поверхонь тертя з показником $I=2223433,67 \text{ мкм}^3/\text{км}$. У порівнянні з традиційним дизельним паливом інтенсивність зношування була у 8,2 раза вищою. При порівнянні зразків дизельних палив, модифікованих іншими додатками, вона перевищувала показники у 1,9–3,1 раза.

Існує також залежність між інтенсивністю зношування контактуючих поверхонь тертя і молекулярною масою іонних рідин. Результати цих досліджень представлені у таблиці 3.

З аналізу отриманих даних виходить, що на процес зношування впливає не тільки структура радикалів іонних рідин (наприклад, присутність ароматичного кільця або атомів кисню), але й довжина молекули. Довший ланцюг молекули забезпечує формування товстішої захисної плівки на поверхні металу, що підтверджують результати мікрофотографічного аналізу.

Друга частина досліджень проводилася у різних середовищах (моторна олива та модифікована моторна олива з додатками) для визначення інтенсивності зношування. Оскільки всі зразки працювали за однакового часу тертя, інтенсивність зношування визначалася за площею плями контакту. Інтенсивність зношування порівнювали між моторною оливою та модифікованою моторною оливою з додатками.

Для оцінки впливу модифікованих моторних олив на інтенсивність зношування було досліджено п'ять зразків різних комбінацій оливи з іонними рідинами. Синім кольором позначено зношування зразка пальця, оранжевим – зношування контрзразка. На рис. 2 представлена діаграма інтенсивності зношування зразків ШХ15 в середовищах чистої оливи та з домішками.

Одержані результати представлені у таблиці 4.

Для чистої мінеральної моторної оливи M10G2k спостерігається найбільша розбіжність інтенсивності зношування у двох дослідженнях. Це явище є закономірним для олив, що не містять хімічно активних модифікуючих компонентів. У присутності додатків такі розбіжності зменшуються, а поведінка системи стає більш передбачуваною.

$C_{12}C_1IM$ -ДБС є іонною рідиною на основі катіона 1-додецил-3-метилімідазолію. Імідазолієві катіони мають більш локалізований позитивний заряд і часто демонструють більшу полярність і хімічну активність на поверхні металу. Суміш з $C_{12}C_1IM$ -ДБС забезпечує протизношувальний ефект завдяки схильності до сильніших поверхневих взаємодій та утворенню більш міцної трибоплівки, що підтверджується одною з найнижчою інтенсивністю зношування.

C_8C_8IM -ДБС є іонною рідиною на основі катіона 1,3-діоктилімідазолію й містить два довгі алкільні ланцюги (C_8-C_8), що підвищує гідрофобність катіона та сприяє утворенню досить

еластичної адсорбційної плівки на поверхні металу. Результати досліджень вказують на найвищу інтенсивність зношування з досліджених додатків. Ймовірно, що комплекс гідрофобних та адсорбційних факторів призвів до утворення нестабільної і неоднорідної трибоплівки.

$PyrC_{12}$ -ДБС з моторною оливою утворює адсорбційний шар, що зменшує безпосередній контакт метал-метал і підвищує граничне навантаження, але він переважно фізичний і відносно чутливий до температурних коливань. Зниження інтенсивності зношування після введення $PyrC_{12}$ -ДБС пояснюється ефективною адсорбцією піридинієвих катіонів та утворенням захисної плівки.

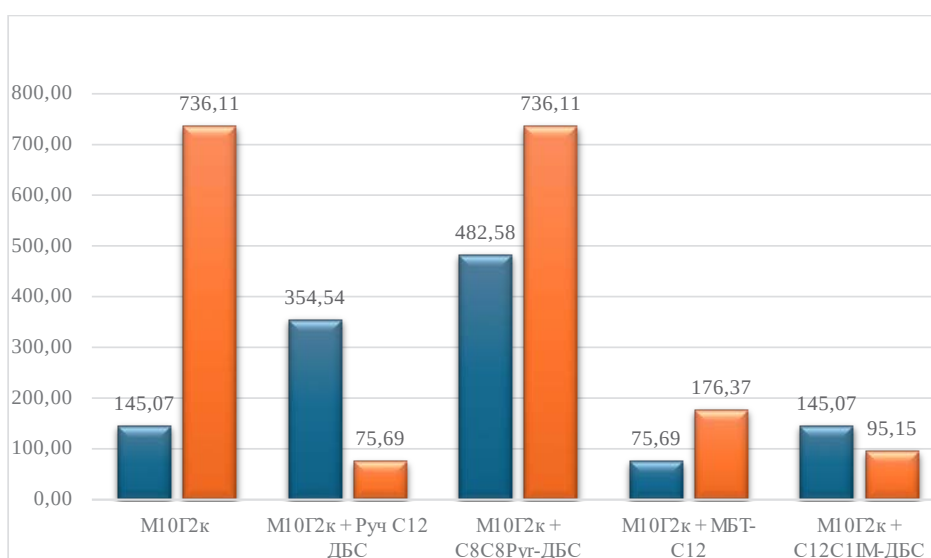


Рис. 2. Інтенсивність зношування в мкм³ у моторній оливі та модифікованій моторній оливі

Таблиця 3

Залежність інтенсивності зношування пар тертя від молекулярної маси іонних рідин

Додатки	ДП + $C_{12}C_1IM$ -ДБС	ДП + Mor- CH_2COOC_{10}	ДП + MBT- C_{12}	ДП + Mor-LA
Молекулярна маса, г/моль	579	285,4	335,5	269,4
I, мкм³	715180,79	885780,98	1179402,04	2223433,67

Таблиця 4

Дані вимірювання плям зношування і розрахунків

Тип оливи	№	Діаметр кола, мкм	Всегм, мкм³	I, мкм³/км
M10Г2к	1	384,6	413,63	145,07
	2	576,9	2098,79	736,11
M10Г2к + $C_{12}C_1IM$ -ДБС	1	384,6	413,63	145,07
	2	346,14	271,29	95,15
M10Г2к + C_8C_8IM -ДБС	1	519,21	1375,93	482,58
	2	576,9	2098,79	736,11
M10Г2к + $PyrC_{12}$ -ДБС	1	480,75	1010,87	354,54
	2	326,91	215,81	75,69
M10Г2к + МБТ- C_{12}	1	326,91	215,81	75,69
	2	403,83	502,86	176,37

МВТ-С₁₂ має будову, що добре підходить для роботи в умовах граничного змащування: меркаптогрупа -SH та атоми S і N у бензотгіазольному кільці забезпечують сильну адсорбцію й часткову хемосорбцію на поверхні металу. Одержані результати вказують, що МВТ-С₁₂ утворює рівномірну і міцну трибоплівку, що підтверджує ефективність додатка з однією з найнижчих інтенсивностей зношування у проведених дослідженнях.

Для комплексного дослідження протизношувальних властивостей дизельних палив, модифікованих додатками, було проведено додаткові випробування. Експерименти проводилися з використанням машини тертя «Micron-tribo», а поверхні оцінювалися за допомогою безконтактних інтерференційних 3D профілометрів «Micron-alpha» та «Micron-beta» [13].

Для оцінки поверхонь використовували інтерференційні 3D профілометри. У межах дослідження було проаналізовано протизношувальні властивості дизельного палива, модифікованого 1-додецил-3-метил-імідазолій додецилбензосульффонатом. Особливістю експерименту є зміна умов і характеру руху поверхонь металу – було вивчено ступінь зношування поверхні металу під час руху за схемою «pin-on-disk».

На рис. 3 представлено результати досліджень щодо зношування пар тертя у середовищах традиційного дизельного палива і дизельного палива, модифікованого 1-додецил-3-метил-імідазолій додецилбензосульффонатом, а саме: за об'ємом зношування (V, мкм³).

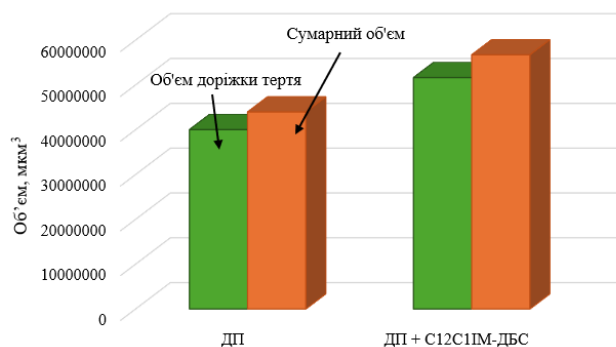


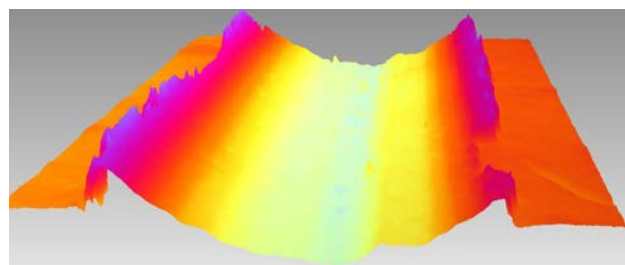
Рис. 3. Об'єм зношування пари тертя (V, мкм³) в середовищі ДП і ДП + С₁₂С₁ІМ-ДБС

Результати випробувань пар тертя за схемами «pin-on-disk» та «палець-площина» демонструють чітку кореляцію між собою. Під час тестування традиційного дизельного палива виявлено нижчий рівень зношування: об'єм утвореної доріжки тертя склав 40022968 мкм³, а сумарний об'єм зношування – 51632934 мкм³. Для пар, які працювали

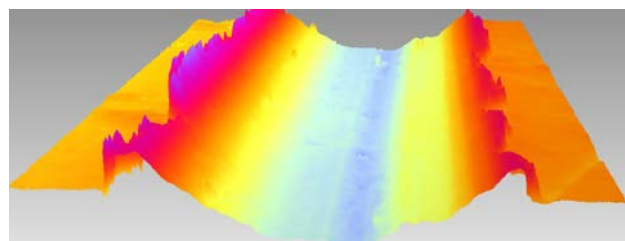
у середовищі дизельного палива, модифікованого С₁₂С₁ІМ-ДБС ці показники дещо вищі: об'єм доріжки тертя – 43974356 мкм³, сумарний об'єм зношування – 56718230 мкм³. В обох випадках коефіцієнт тертя склав 0,15.

На рис. 4а і рис. 4б наведено мікротопографії поверхонь тертя, за результатами проведених досліджень пар тертя у відповідних середовищах.

Одержані мікротопографії свідчать про більший об'єм зношування поверхні металу, що досліджений у середовищі дизельного палива, модифікованого С₁₂С₁ІМ-ДБС у порівнянні з традиційним дизельним паливом. Це підтверджує одержані результати об'єму зношування пар тертя для обох дослідження.



а



б

Рис. 4. Мікротопографії поверхонь тертя металу:
а – дизельне паливо,
б – дизельне паливо + С₁₂С₁ІМ-ДБС

Висновки. Результати трибологічних досліджень свідчать про значний вплив іонних рідин на інтенсивність зношування металевих поверхонь у середовищі дизельних палив. Виявлено, що ефективність модифікації залежить не лише від хімічної структури іонних рідин, але також і від їхньої молекулярної маси та довжини вуглеводневого радикала.

Зокрема, найнижчі рівні інтенсивності зношування досягнуті для дизельного палива, модифікованого 1-додецил-3-метилімідазолій додецилбензосульффонатом (С₁₂С₁ІМ-ДБС), який показав зниження інтенсивності зношування на 17–35 % порівняно з іншими дослідженими видами палива. Такий результат пов'язується зі здатністю

молекули формувати щільну адсорбційну плівку завдяки довгому алкільному ланцюгу.

При цьому, модифікація дизельного палива N-додеканоїлморфоліном сприяла підвищеному зношуванню порівняно з традиційним дизельним паливом. Це, імовірно, пов'язане із присутністю атомів кисню в молекулі, які можуть викликати руйнування оксидного шару поверхні й появу локальної корозії під час тертя. Аналогічна тенденція зафіксована для палива, модифікованого MBT- C_{12} , де спостерігалось підвищене мікрозношування через слабке адсорбційне зв'язування з поверхнею металу.

Результати проведених досліджень за схемами «палець-площина» та «pin-on-disk» показали подібну тенденцію: зразок дизельного палива + $C_{12}C_1IM$ -ДБС продемонстрував найнижчі втрати матеріалу у порівнянні з іншими іонними рідинами. Це свідчить про стабільність утвореної граничної плівки, яка ефективно розділяє контактуючі поверхні. Мікротопографічний аналіз виявив, що поверхня після роботи в середовищі модифікованого дизельного палива має рівномірний рельєф, що свідчить про м'який режим тертя.

Встановлена кореляція між молекулярною масою іонних рідин та інтенсивністю зношування дозволяє зробити висновок, що довший вуглеводневий радикал позитивно впливає на протизношувальні властивості дизельних палив. Подовжені радикали покращують здатність молекул іонних рідин до орієнтації та адсорбційної взаємодії з поверхнею металу, що сприяє утворенню стійкої гідрофобної захисної плівки.

Отже, результати проведених досліджень демонструють найбільшу ефективність імідазолієвих іонних рідин, зокрема $C_{12}C_1IM$ -ДБС, для покращення протизношувальних властивостей дизельних палив. Захисна плівка формується за рахунок електростатичної взаємодії полярних груп іонних рідин із поверхнею металу, а також завдяки міжмолекулярному впорядкуванню довгих алкільних ланцюгів.

Однак більшість досліджених зразків дизельного палива, модифікованих іонними рідинами,

показали нижчу ефективність у протизношувальних властивостях порівняно з традиційним дизельним паливом. Це може бути спричинено недостатньою концентрацією іонних рідин у паливі або їх незадовільною сумісністю з основною вуглеводневою складовою. Незважаючи на це, дослідження виявили зразок $C_{12}C_1IM$ -ДБС, як найефективніший серед проаналізованих іонних рідин. Ця сполука може стати базою для розробки сучасних протизношувальних присадок нового покоління. Подальші дослідження варто спрямувати на оптимізацію її концентрації, вдосконалення структури та оцінку впливу температурних і механічних факторів на формування захисної плівки у зоні тертя.

Дослідження показали, що додавання іонних рідин до дизельних палив впливає на характер тертя та інтенсивність зношування поверхонь металу. Одержані результати свідчать про необхідність подальшої оптимізації складу і концентрації іонних рідин для їх використання у дизельному паливі.

При цьому, проведені дослідження показали, що модифікування мінеральної моторної оливи M10Г2к іонними рідинами впливає на інтенсивність зношування сталі ШХ15. Найменш ефективним виявилась іонна рідина C_8C_8IM -ДБС, що утворює нестабільну та неоднорідну трибоплівку. $RurC_{12}$ -ДБС суттєво знижує зношування, але її захисна дія обмежена у часі фізичною адсорбцією. Додавання $C_{12}C_1IM$ -ДБС сприяє утворенню стабільної трибоплівки завдяки сильнішим взаємодіям з поверхнею металу, що забезпечує одну з найнижчих інтенсивностей зношування. Найбільш ефективним виявилось додавання MBT- C_{12} , яка утворює рівномірну та стійку трибоплівку. Загалом, присадки з вираженою хемосорбцією та довгими алкільними ланцюгами забезпечують найбільш стійкий протизношувальний ефект.

Одержані результати експериментальних досліджень можуть бути використані для подальших наукових досліджень з метою отримання доказової бази щодо використання впливу іонних рідин для покращення протизношувальних властивостей дизельних палив.

Список літератури:

1. Trofimov I., Svyryd M., Hetmanenko L., Ternovenko S. Influence of electric field on antiwear properties of Jet aviation fuels reformulated by biocomponents. *International independent scientific journal*. 2020. Vol. 1, № 20. P. 23-30.
2. Сіренко Г.О., Мідак Л.Я., Кузишин О.В., Кириченко Л.М., Кириченко В.І. Антифрикційні властивості полікомпонентних композицій на основі хімічно-модифікованої ріпакової оливи під час мащення пари ароматичний поліамід. *Полімер. журн.* 2008. Т. 30, № 4. С. 338-344.
3. ASTM D975-21. Standard Specification for Diesel Fuel. 2021. 28 p.

4. Ben Salah H., Nancarrow P., Al Othman A. Desulfurization of Diesel Using Ionic Liquids: Process Design and Optimization Using COSMO-Based Models and Aspen Plus. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8(33). 30001-30023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01952>.
5. Barbour R., Rickeard D., Elliott N. Understanding Diesel Lubricity. *SAE Technical Paper*. 2000. Vol. 01. 1918. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-1918>.
6. Deyab M.A., Mohsen, Q. Improving the sustainability of biodiesel by using imidazolium-based ionic liquid. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. 16832. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96358-9>.
7. Jia S., Qin J., Chen L., Zhang Y., Mao Y., Lin H., Han S. Tribological properties and synergistic lubrication mechanism between tetramethyl dodecyl diisooctyl phosphate ionic liquids and molybdenum-based metal organic frameworks additives. *Wear*. 2025. Vol. 576-577. 206137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.206137>.
8. ДСТУ 7688:2015. Паливо дизельне Євро. Технічні умови. Київ, 2016. 12 с.
9. Пристрій для дослідження матеріалів на тертя та зношування при зворотно-поступальному русі: пат. 45574 Україна: МПК G 01 N 3/56. № u200908003; заявл. 29.07.09; опубл. 10.11.09, Бюл. № 21. 8 с.
10. Пристрій для дослідження поверхонь тертя в постійному рівномірному та нерівномірному магнітному полі: пат. 70877 Україна: МПК G01N 3/56. № u201115161; заявл. 21.12.11; опубл. 25.06.12, Бюл. № 12. 5 с.
11. Трофімов І. Л., Бурикін В. В., Захарчук В. П. Дослідження протизносних властивостей палив, оброблених електричним полем, за схемою трибоконтакту «циліндр – площа». *Збірка наукових праць Інституту надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України*. 2011. № 14. С.602-608.
12. Пристрій для дослідження матеріалів на тертя та зношування: пат. 36600 Україна: МПК G01N 3/56. № u200809663; заявл. 23.07.08; опубл. 27.10.08, Бюл. № 20. 3 с.
13. Безконтактний триимірний профілометр: пат. 39972 Україна: МПК G 01 B 9/02, G 01 B 11/30. № u200809989; заявл. 01.08.08; опубл. 25.03.09, Бюл. № 6. 3 с.

Tsyhanenko V.P., Trofimov I.L., Rogalskyi S.P. IMPACT OF FUNCTIONAL CHEMICAL ADDITIVES ON THE ANTIWEAR PROPERTIES OF DIESEL FUELS AND MOTOR OILS

The article discusses the issue of antiwear properties of diesel fuels. The main purpose of the work was experimental research on the influence of ionic liquids on changing the antiwear properties of traditional diesel fuels. The goal was also to study the influence of different types of ionic liquids on the antiwear properties of diesel fuels. Experimental research was conducted, using the best methods, on changing the antiwear properties of traditional diesel fuels by adding ionic liquids. The results of the studies indicate the greatest effectiveness of imidazole ionic liquids, in particular C₁₂C₁IM-DBS, for improving the antiwear properties of diesel fuels. The film is formed due to the electrostatic interaction of polar groups of ionic liquids with the metal surface, as well as due to the intermolecular ordering of long alkyl chains. At the same time, the results of the studies showed that most samples of diesel fuels modified with ionic liquids showed worse antiwear properties compared to traditional diesel fuel. This may be due to both the low concentration of ionic liquids in diesel fuel and the insufficient mutual compatibility of individual compounds with hydrocarbon fuel. The obtained research results have a positive scientific effect, as they allowed us to identify a sample – C₁₂C₁IM-DBS, which showed the best performance among the studied ionic liquids and can become the basis for the development of effective anti-wear additives of a new generation. Further research should be directed at optimizing the concentration of this compound, modifying its structure and assessing the influence of temperature and load factors on the formation of a protective film.

The studies have shown that the addition of ionic liquids to diesel fuels affects the nature of friction and the intensity of wear of metal surfaces. The obtained results indicate the need for further optimization of the composition and concentration of ionic liquids for their use in diesel fuel.

At the same time, the conducted studies showed that the modification of mineral motor oil M10G2k with ionic liquids affects the intensity of the increase in steel ShKh15. The most effective was the ionic liquid C₈C₈Pyr-DBS, and the most effective was the addition of MVT-C₁₂, which creates a uniform and stable tribofilm. In general, additives with pronounced chemisorption and long alkyl chains provide the most stable antiwear effect.

Keywords: antiwear properties, diesel fuel, motor oil, ionic liquids, friction, wear.

Дата першого надходження статті до видання: 01.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 661.094.56
DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/26>

Шкода В.О.

<https://orcid.org/0009-0000-8811-0391>
Дніпровський державний технічний університет

Кравченко О.В.

<https://orcid.org/0009-0006-8833-3441>
Дніпровський державний технічний університет

Гуляєв В.М.

<https://orcid.org/0000-0002-4991-6250>
Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А.Л.

<https://orcid.org/0000-0003-1496-6634>
Дніпровський державний технічний університет

АВТОКЛАВНЕ ЛУЖНЕ ВИЛУГОВУВАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ РТ(PD)-КАТАЛІЗАТОРІВ НА АЛЮМІНІЙВМІСНОМУ НОСІЇ З МІНІМАЛЬНИМИ ВТРАТАМИ ПЛАТИНОЇДІВ

У роботі представлено результати досліджень ефективності автоклавного лужного вилугування відпрацьованих каталізаторів типу Al–Pt(Pd) із застосуванням композиційних добавок, спрямованих на мінімізацію втрат благородних металів у маточному розчині. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю ресурсозбереження та підвищення екологічної безпеки технологій переробки каталітичних відходів, в яких містяться платина й паладій у кількостях до 0,7 мас.%. Запропоновано комбінований процес, що включає попереднє підігрівання розчину NaOH із введенням гідроксиламіну, алюмінію нітрату та ізобутилового спирту (2-метилпропанолу-1) у співвідношенні 1:2:1 при загальній витраті добавок 0,5–2,0 % від маси каталізатора, подальше автоклавне витримування з підвищенням температури до 140–200 °C і вилугування протягом 3–8 годин. Експериментальні дослідження показали високу ефективність запропонованої схеми: ступінь вилучення платини досягає 99,7 %, паладію – 97 % за оптимальних режимних параметрів і концентрацій добавок. Попередній прогрів із введенням добавок при 40–70 °C дозволяє звести до мінімуму частковий перехід платинових металів у розчин на ранніх стадіях процесу, що зменшує їх втрати у маточних розчинах. У роботі також наведено результати варіацій складу добавок: зменшення або збільшення частки будь-якого компонента призводить до помітних змін у виходах платиноїдів, що свідчить про синергійний характер їх дії. Науково-технологічний внесок полягає у виявленні механізму підвищення вилучення платиноїдів шляхом зміщення рівноваги сорбційних процесів. Показано, що застосування зазначених добавок сприяє десорбції комплексних аніонів платиноїдів із розвинутої поверхні оксидного носія та їх переведенню в розчинну форму, а також зміні лігандного оточення комплексів, що підвищує ентальпію сольватації й сприяє більш повному переходу металів у розчин. Такий підхід дозволяє уникнути утворення великих об'ємів розбавлених розчинів і знизити необхідність подальшої переробки рідких відходів. Практична цінність запропонованої технології полягає в можливості її впровадження на існуючих підприємствах без значної модернізації обладнання, використанні доступних реагентів, а у перспективі – у застосуванні маточного розчину натрію алюмінату для отримання носіїв каталізаторів та адсорбентів. Запропонований метод поєднує високу технологічну ефективність (мінімальні втрати Pt, Pd), економічну доцільність і екологічну прийнятність, що робить його перспективним для промислового впровадження в галузях, де утворюються відпрацьовані каталізатори.

Ключові слова: платина, паладій, каталізатор, автоклавне вилугування, алюміній, десорбція.

Постановка проблеми. У літературі описано безліч методів переробки каталізаторів різного призначення [1, с. 120]. За обсягом їх виробництва це насамперед каталізатори нафтохімічних підприємств, основного органічного та неорганічного синтезу, штучного каучуку, систем газоочищення, у тому числі нейтралізаторів автомобільних викидів, тощо.

Великий перелік каталітичних процесів, що розвиваються, диктує розширення номенклатури каталізаторів. Це призводить не тільки до зміни складу каталітичних металів або їх композицій, але й до зміни хімічних форм основ використовуваних каталізаторів, які постійно розширюються [2, с. 362]. Типовими видами носіїв гетерогенних каталізаторів є оксиди алюмінію в α - і γ -модифікаціях, алюмосилікати, шпинелі, цеоліти, модифіковані вуглецеві композиції, тощо. Очевидно, що створити універсальний спосіб переробки всієї гами існуючих каталізаторів надзвичайно важко.

У процесі експлуатації, Al-Pt(Pd) каталізатори, що містять від 0,1 до 0,7 мас.% благородних металів, знижують свою активність, селективність та інші характеристики. Після закінчення терміну служби їх направляють як відпрацьовані (деактивовані) у переробку, поряд із відходами каталізаторного виробництва. Найбільш простим способом утилізації дезактивованих Al-Pt(Pd) каталізаторів визнана їхня плавка в термічних печах спільно з мідно-нікелевою сировиною при температурі 1350°C. Метали платинової групи губляться у великих кількостях через розподіл їх за продуктами плавки, обсяги яких є значними [3, с. 670].

Способи вилучення платини та паладію викладено у роботах [4–7]. Відомі способи гідрометалургійного солянокислого розкладання дезактивованих каталізаторів: обробка в розчині 1 М HCl і 30% H₂O₂, розчині 12 М HCl з додаванням HClO₃. До кислих способів розкладання відносяться методи сульфатнокислого вилуговування при 300°C. Кислі способи найчастіше передбачають використання високих температур, що призводить до розкладання кислот, виділення газів, парів, шкідливих для обслуговуючого персоналу, навколишнього середовища, агресивних для устаткування. Крім того, концентрація Pt (Pd) в розчинах незначна і для їх виділення потрібна підвищена витрата реагентів для цементації. Втрати платини при цьому становлять 3–5%.

Перша група способів, заснованих на принципі переведення носія в розчинний стан різними

прийомами, наприклад, кислотним або лужним [8, с. 150], має обмеження роботи лише з каталізаторами на основі γ -Al₂O₃. Однак у процесі експлуатації каталізатора риформінгу у ньому накопичується істотна частка Al₂O₃ в α -модифікації (до 30%). Ця частка каталізатора капсулює благородний метал і переходить нерозчинний осад, в результаті чого бажаного концентрування не відбувається.

Друга група способів, що використовують окислювальні середовища з метою переведення платинових металів у розчин [9 с. 539], також має суттєвий недолік, пов'язаний із труднощами, а іноді неможливістю повного вилучення металів. Це пов'язано із загальною проблемою повнішого переведення металів у розчин у присутності великої кількості нерозчинної основи з високою питомою поверхнею, що досягає величини 125 м²/г.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі комбіновані, кислотно-лужні способи переробки відпрацьованих каталізаторів. Відповідно до [10 с. 207] сировину обробляють нітратною кислотою або нітратною кислотою з добавкою HF. Залишок вилуговування сплавляють з NaOH при температурі 750°C. Плав далі вилуговують водою. Використання таких способів пов'язане зі значними енерговитратами.

Відомо багато лужних способів переробки дезактивованих каталізаторів [11, с. 145]. Основним завданням таких способів є переведення їх основи (Al₂O₃) у розчин, наприклад, у вигляді алюмінату натрію [12, с. 45]. Платина (паладій) в основному концентрується в нерозчинному залишку вилуговування. Дані способи можуть здійснюватися різними шляхами: сплавленням з NaOH, спіканням із содою з подальшим вилуговуванням спеку водою. Крім того, відомо, що основу дезактивованих Al-Pt(Pd) каталізаторів розчиняють в автоклавах в концентрованих розчинах натрій гідроксиду. Температуру в автоклавах підтримують в межах 160–200°C протягом 3 год, при гідромодулі 1:1,25. При цьому отримують концентрат із вмістом дорогоцінного металу до 7,64%.

До недоліків лужних способів переробки відпрацьованих каталізаторів відноситься частковий перехід металів платинової групи в рідку фазу пульпи алюмінату натрію. Втрати металів у такому разі будуть визначатися їх концентрацією і обсягом одержуваних розчинів. Відомо, що для зменшення втрат із розчином на стадії вилуговування застосовують відновники, наприклад, металевий алюміній, гідразин, формалін [13, с. 15].

За технологією, викладеною в [14, с. 135] пропонується проводити автоклавне вилугування дезактивованих каталізаторів, що містять платину або паладій, водним розчином лугу при температурі 160-170°C. при цьому отримують 7 мас.% концентрат дорогоцінного металу. За вказаним способом не передбачається введення добавок в автоклав для запобігання переходу в розчин різних сполук платинових металів (до 1-3 мас.%), що утворилися в процесі експлуатації каталізатора і під час попереднього випалу, що тягне за собою додаткову цементацію пульпи, що утворилася різними відновниками.

Постановка завдання. Завданням даного дослідження є створення способу переробки дезактивованих платинових та паладієвих каталізаторів з мінімальними втратами металу з розчином після автоклавного вилугування з можливістю подальшого використання розчину алюмінату натрію для виробництва носіїв для каталізаторів гідроочищення, осушувачів газів, адсорбентів.

Виклад основного матеріалу. У попередньо нагрітій в автоклаві до 40-70°C розчин лугу (40 мас.% NaOH) засипали відпрацьований каталізатор, і вводили добавки: гідроксиламін (NH_2OH), алюміній нітрат ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$), ізобутиловий спирт (2-метилпропанол-1), взятих у масовому співвідношенні (1...3):(1...3):(1... 3) та у сумарній кількості $\leq 2\%$ від маси каталізатора. Розчин витримували 2-5 год при температурі 50-70°C. Після витримки автоклав розігрівали до температури 140-200°C і проводили вилугування протягом 3-8 год.

Проведені дослідження показали, що запропонований спосіб автоклавного вилугування дозволяє досягти вилучення Pt 99,7%, Pd – 97%. Введення добавок дозволяє на звести до мінімуму частковий перехід дорогоцінних металів у розчин. Повне виключення однієї з добавок помітно знижує ефективність добавки в цілому, витрата компонента, що компенсує, різко зростає, що ускладнює переробку алюмінієвого розчину, і знижує економічні показники. Кількість добавок та їх співвідношення залежить від виду та змісту дорогоцінного металу. Досягнуті показники вилучення металів наведено у таблиці 1.

Результати проведених дослідів показують, що зменшення кількості одного з компонентів добавки призводить до помітного збільшення втрат дорогоцінного металу з маточним розчином (більше 0.3 мас.% платини; більше 3 мас.% паладію). З іншого боку, збільшення кількості однієї з добавок не призводить до подальшого зменшення втрат дорогоцінного металу з маточним розчином.

Таким чином, для проведення вилугування дезактивованих каталізаторів розчином лугу з метою вилучення платини або паладію оптимальним співвідношенням добавок (гідроксиламіну, азотнокислого алюмінію, ізобутилового спирту) є 1:2:1 при загальній кількості добавок 1,5% від маси каталізатора.

Для створення ефективної технології переробки каталізаторів, що містять метали платинової групи на основі Al_2O_3 , необхідно провести стадію переведення платиноїдів у водорозчин-

Таблиця 1

Результати дослідів із вилучення платиноїдів з відпрацьованого каталізатора

№ з/п	Цільовий метал	Вміст металу у відпрацьованому каталізаторі, мас. %	Співвідношення добавок, мас. %			Ступінь вилучення, мас. %
			NH_2OH	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	2-метилпропанол-1	
1	Pt	0,51	2,0	2,0	1,0	99,0
2		0,12	1,0	1,0	0,5	99,9
3		0,12	1,0	1,0	1,0	99,7
4		0,12	1,0	1,0	2,0	99,7
5		0,12	0,5	2,0	1,0	99,5
6		0,12	3,0	2,0	1,0	99,4
7		0,12	2,0	0,5	1,0	99,1
8		0,12	2,0	3,0	1,0	99,3
9	Pd	0,46	2,0	2,0	1,0	98,7
10		0,18	1,0	1,0	1,0	97,2
11		0,18	1,0	0,5	1,0	92,4
12		0,18	1,0	3,0	1,0	98,2
13		0,18	0,5	2,0	1,0	90,3
14		0,18	3,0	2,0	1,0	97,7
15		0,18	2,0	2,0	0,5	93,1
16		0,18	2,0	2,0	3,0	97,2

ний стан. Це досягається у процесі їх окислення широким набором реагентів, робота з якими найкраще адаптована до конкретного виробництва. Важливо врахувати хімічну індивідуальність благородного металу, екологічну безпеку та економічну ефективність реагентів, що застосовуються. У гідрометалургійному варіанті це концентровані розчини нітратної кислоти, суміш $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$, обробка елементарним хлором, іншими композиціями, що хлорують, тощо.

Інша область застосування запропонованого способу полягає в можливості його використання з метою вилучення платиноїдів з поверхні гідратних опадів, що утворюються на стадії очищення платинових металів, а також переробки неорганічних сорбентів, що застосовуються як наповнювачі запірних колон зливних розчинів, там, де вирішується проблема зменшення вмісту благородних металів.

Інноваційність запропонованого способу полягає у проведенні операцій, що сприяють зміщенню рівноваги процесів сорбції комплексних іонів платиноїдів на розвинену поверхню основи та їх десорбції з переходом у розчин.

Усунення рівноваги процесу сорбції може здійснюватися двома методами. По першому методу проводять багаторазові промивки з наступними фільтраціями. При цьому об'єм нової партії розчинника швидко насичується до рівноваги солями платинових металів і його доводиться оновлювати. Введення нових порцій розчину призводить, в підсумку, до отримання великого об'єму «бідних» розчинів, що тягне за собою складність їх подальшої переробки. Головне завдання – зменшення залишкового вмісту металів на катализаторі до рівня їхньої концентрації набагато менше, ніж у природній сировині, не вирішується.

Альтернативний підхід полягає у зміні хімічної форми сорбованого комплексного іона пла-

тиноїдного металу з метою зсування рівноваги у розчині. Науковим обґрунтуванням такої можливості є експериментально встановлені факти залежності екстрагування в органічну фазу комплексних іонів одного і того ж центрального атома з різним лігандним оточенням. Наприклад, константи екстракції пар іонів виду $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ та $[\text{PtCl}_4]^{2-}$, $[\text{PdCl}_6]^{2-}$ і $[\text{PdCl}_4]^{2-}$ розрізняються, як мінімум, у три порядки. Це явище пов'язується зі збільшенням енергії гідратації комплексних іонів металів у нижчому зарядовому стані центрального атома через менший геометричний розмір та можливість координації молекул води по третій координаті [15, с. 103].

Експериментальні дані щодо аніонообмінної екстракції координаційних сполук з різними лігандами та розрахунки енергії гідратації однозначно вказують на різке збільшення енергії гідратації у іонів з меншим ступенем окиснення центрального атома. Тому необхідно змінити хімічну форму знаходження платинового металу в розчині таким чином, щоб вона мала максимально можливу в конкретних умовах ентальпію гідратації, оскільки основний внесок в енергетику процесу робить саме сольватаційна складова.

Висновки. Головна технологічна перевага запропонованого способу полягає в кількісному переведенні хлорокомплексів Pt або Pd з вищого ступеня окислення в нижчий, що дозволяє збільшити вміст металу в розчині і призводить до високого ступеня вилучення металів. Такі операції пов'язані зі зміною ступеня окислення комплексних платинових металів, і часто проводяться на афінажних підприємствах.

Впровадження запропонованого способу в технологічну практику не вимагає зміни існуючого обладнання, застосування дорогих або дефіцитних реагентів і може бути адаптовано до будь-якого з діючих виробництв нітратних сполук.

Список літератури:

1. Черненко Я. М., Волошин М. Д., Ларичева Л. П. Катализатори та сорбенти. Кам'янське: ДДТУ, 2017. 317 с.
2. Kuznetsov B. N. et al. Properties of palladium catalysts on carbon supports prepared from chemically modified and activated anthracites. *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*. 2004. Vol. 83. №. 2. P. 361-367. <https://doi.org/10.1023/B:REAC.0000046098.90626.56>
3. Yatsimirsky V. K., Boldyreva O. Y. Catalytic oxidation of small molecules in a gas phase in the presence of heterogenized platinum and palladium complexes with chemically different ligands. *Kinetics and catalysis*. 2003. Vol. 44. №. 5. P. 669-676. <https://doi.org/10.1023/A:1026150224172>
4. Соловйов С. О., Орлик С. М. Каталітичні нейтралізатори відпрацьованих газів ДВЗ. *Наука та інновації*. 2005. Т. 1. №. 2. С. 58-72.
5. Векшин В. О. та ін. Визначення стабільності нанесеного платинового катализатора селективного відновлення оксидів нітрогену. *Наукові вісті Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут*. 2012. №. 3. С. 98-102.
6. Savenkov A. S., Avina S. I., Loboiko V. A. Kinetics of loss of platinum group metals in catalytic oxidation of ammonia. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012. Vol. 85. №. 10. P. 1524-1530. <https://doi.org/10.1134/S1070427212100060>

7. Климаш А. О., Соловйов Г. І., Ковальов С. М. Каталітичний нейтралізатор з металоволокневим каталізатором для очищення вихлопних газів двигунів внутрішнього згоряння. *Проблеми розвитку транспорту і логістики*. 2017. С. 180-181.
8. Авина С. И., Гринь Г. И. Определение потерь металлов платиновой группы в технологии азотной и синильной кислот. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2018. №. 45 (1321). С. 148-152. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.20>
9. Sassykova L. et al. Synthesis of catalysts on the metal block carriers and testing their effectiveness in the real conditions of operation. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2018. Vol. 53. №. 3. P. 537-542.
10. Suvorin A. V. et al. Mathematical modeling of the equilibrium between nitrogen (II) and (IV) oxides in the combined process of metals extraction from the spent catalysts. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019. №. 6. P. 205-212. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-127-6-205-212>
11. Шинкарук Х. М. та ін. Теоретичне обґрунтування можливості застосування термокаталітичного методу для визначення теплоти згоряння природного газу. *Перспективні технології та прилади*. 2021. №. 18. С. 143-148. <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2021-18-21>
12. Vekshyn V., Babakin V. Development of a reactor for low-temperature catalytic reduction of nitrogen oxide emissions at nitrogenfertilizer enterprises. *Technogenic and ecological safety*. 2023. Vol. 14. №. 2. P. 42-49. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2023.2.5>
13. Ведь В. Є., Ведь О. В., Широков С. Дослідження властивостей первинних носіїв каталізаторів конверсії СО. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. №. 3. С. 13-25. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2025.3.02>
14. Korchuganova O. et al. On Obtaining Nanomaterials from Industrial Waste. *Advances in Science and Technology*. 2025. Vol. 162. P. 133-142. <https://doi.org/10.4028/p-6vRed7>
15. Glikin M. A. et al. A new way to increase catalyst activity. *Adsorption Science & Technology*. 2001. T. 19. №. 2. С. 101-115. <https://doi.org/10.1260/0263617011494015>

Shkoda V.O., Kravchenko O.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L. AUTOCLAVE LEACHING OF SPENT Pt(Pd)-CATALYSTS ON ALUMINIUM-BASED SUPPORTS WITH MINIMAL PLATINUM LOSSES

This study presents an investigation into the efficiency of autoclave alkaline leaching of spent Al–Pt(Pd) catalysts using a set of composite additives designed to minimize losses of platinum-group metals (PGMs) to secondary waste streams while maximizing their recovery in the primary leachate. The work is motivated by the need to conserve critical resources and to reduce the environmental footprint of catalyst recycling technologies, since spent Al-supported catalysts frequently contain platinum and palladium in concentrations ranging approximately from 0.1 to 0.7 wt.%. We propose and experimentally evaluate a combined process that comprises preheating a 46% NaOH solution with staged addition of hydroxylamine hydrochloride, aluminum nitrate, and isobutanol (2-methylpropanol-1) in a mass ratio of 1:2:1, at a total additive loading of 0.5–2.0% relative to catalyst mass. After this preparatory stage, the mixture is subjected to autoclave leaching at elevated temperatures of 140–200 °C for durations of 3–8 hours.

Experimental results demonstrate the high effectiveness of the proposed protocol: platinum extraction reaches up to 99.7% and palladium extraction up to 97% under optimized conditions of temperature, residence time and additive composition. The preheating step with the specified additives at 40–70 °C significantly suppresses premature transfer or irreversible loss of PGMs during early contact stages, thereby reducing the generation of highly diluted secondary solutions that would require additional treatment. Variations of the additive proportions revealed a pronounced synergistic effect; departures from the optimized 1:2:1 ratio lead to measurable declines in recovery rates, indicating the co-operative roles of the reducing agent, complexing/aluminum source and organic phase modifier.

The scientific contribution of the work lies in elucidating the mechanistic basis for enhanced PGM recovery: the additives shift adsorption–desorption equilibria at the oxide carrier surface, promoting desorption of PGM-containing anionic complexes into solution and altering ligand environments so as to increase solvation enthalpies and favor dissolution. Hydroxylamine plays a reductive/complex-stabilizing role, aluminum nitrate influences surface speciation and competitive adsorption, while isobutanol modifies interfacial properties and phase behavior to limit re-adsorption and re-precipitation phenomena.

From a practical standpoint, the proposed approach is compatible with existing industrial equipment and uses readily available reagents, which facilitates scale-up without major capital expenditure. Furthermore, the composition of the resulting pregnant leach solution (notably sodium aluminate content) opens opportunities for valorization – for instance, regeneration of catalyst supports or production of alumina-based adsorbents – thereby improving overall process economics and material circularity. In sum, the developed autoclave alkaline leaching scheme combines high PGM recovery, reduced secondary waste formation and favorable prospects for industrial implementation in sectors generating spent Al–Pt(Pd) catalytic materials.

Keywords: platinum, palladium, catalyst, autoclave leaching, aluminium, desorption.

Дата першого надходження статті до видання: 18.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 67.017

DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/27>

Євтушенко А.В.

<https://orcid.org/0000-0002-7103-9186>

Херсонський національний технічний університет

Бойко Г.А.

<https://orcid.org/0000-0001-8773-5525>

Херсонський національний технічний університет

Зілінський А.І.

<https://orcid.org/0000-0003-4258-7738>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ НА ВІДОКРЕМЛЮВАНІСТЬ ЛУБ'ЯНОГО ВОЛОКНА ЗІ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО

У статті досліджено вплив параметрів ультразвукової кавітаційної обробки на процес відокремлення луб'яного волокна зі стебел льону олійного. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності первинної переробки луб'яних культур та пошуку енергоефективних і екологічно безпечних технологій виділення волокна. Морфологічна будова стебел льону олійного характеризується складною структурою, у якій волокнисті пучки з'єднані з деревинною частиною пектиновими, геміцелюлозними та лігніновими сполуками. Саме руйнування цих міжклітинних зв'язків визначає ефективність процесу відокремлення волокна. Перспективним способом інтенсифікації цього процесу є застосування ультразвукової кавітації, яка створює локальні гідродинамічні удари та мікрострумені, що сприяють руйнуванню міжклітинної матриці без значного пошкодження волокон.

Метою дослідження є визначення впливу температури середовища, потужності ультразвукового випромінювання та тривалості обробки на відокремлюваність луб'яного волокна зі стебел льону олійного. Для проведення експерименту стебла льону олійного нарізали на відрізки довжиною 40 мм, що відповідало розмірам робочої камери трубчастого ультразвукового кавітатора з радіальною модою коливань. Отримані зразки було розподілено на верхівкову, серединну та прикореневу частини. Після ультразвукової обробки зразки висушували до вологості 16–20 %, після чого визначали відокремлюваність луб'яного волокна від деревинної частини стебла.

Дослідження проводили з варіюванням тривалості обробки (1,5–7,5 хв), температури середовища (30–70 °С) та потужності ультразвукового впливу (200–500 Вт). Встановлено, що найвища відокремлюваність волокон досягається за температури близько 60 °С та потужності 450 Вт. Оптимальна тривалість обробки залежить від частини стебла: для верхівкової – 3 хв., для серединної – 6 хв., для прикореневої – 7,5 хв. Отримані результати підтверджують перспективність використання ультразвукової кавітаційної обробки для підвищення ефективності виділення луб'яного волокна зі стебел льону олійного.

Ключові слова: льон олійний, солома, первинна переробка, ультразвуковий кавітатор, відокремлюваність.

Постановка проблеми. Ефективність первинної переробки луб'яних культур, зокрема льону олійного, значною мірою залежить від здатності руйнувати міжклітинні зв'язки між волокнистими пучками та деревинною частиною стебла. Традиційні методи виділення луб'яного волокна часто характеризуються значною тривалістю процесу, високими енерговитратами та нерівномірністю руйнування структурних зв'язків у стеблі. Це зумовлює необхідність пошуку нових технологічних рішень, здатних забезпечити інтенсифікацію процесу виділення волокна при збереженні його фізико-механічних властивостей.

Перспективним напрямом є використання ультразвукової кавітації, яка дозволяє ефективно руйнувати пектиново-геміцелюлозні зв'язки між волокном і деревинною частиною стебла. Зокрема, застосування трубчастого ультразвукового кавітатора з радіальною модою коливань забезпечує формування симетричного кавітаційного поля та рівномірний вплив на сировину [1]. Проте вплив основних параметрів ультразвукової обробки на процес відокремлення волокна для різних частин стебла льону олійного потребує подальшого дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення ефективності первинної переробки льону олійного та покращення відокремлюваності луб'яного волокна від деревинної частини стебла є предметом досліджень як вітчизняних, так і зарубіжних науковців. У наукових роботах зазначається, що процес виділення волокна значною мірою залежить від ступеня руйнування пектинових і геміцелюлозних зв'язків, які утримують волокнисті пучки у структурі стебла [2, 3].

У вітчизняних дослідженнях значну увагу приділено традиційним способам первинної переробки льону – польовому вилежуванню, водному вимочуванню та механічній обробці стебел. Встановлено, що ефективність відокремлення волокна значною мірою залежить від ступеня розкладання пектинових речовин у процесі формування трести. При цьому не долежування або перележування стебел негативно впливає на якість волокна та ускладнює його подальшу переробку [4, 5].

Зарубіжні дослідження також підтверджують, що метод первинної обробки стебел істотно впливає на структуру та фізико-механічні властивості волокон. Значна частина робіт присвячена дослідженню процесу реттингу (retting), під час якого відбувається мікробіологічне або хімічне руйнування міжклітинних зв'язків, що сприяє відокремленню волокон від деревинної частини стебла [6].

Останніми роками все більшої уваги набувають фізичні методи інтенсифікації процесу виділення волокна, зокрема використання ультразвукової обробки. Дослідження показують, що ультразвукова кавітація сприяє руйнуванню клітинної структури рослинної сировини та прискорює процес деструкції міжклітинних зв'язків, що покращує відокремлюваність волокон і скорочує тривалість технологічного процесу [7, 8].

Отже, аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що удосконалення технологій первинної переробки льону олійного та застосування фізичних методів інтенсифікації процесу руйнування міжклітинних зв'язків є перспективним напрямом підвищення ефективності виділення луб'яного волокна.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення впливу параметрів ультразвукової кавітаційної обробки (температури середовища, потужності ультразвукового випромінювання та тривалості обробки) на відокремлюваність луб'яного волокна зі стебел льону олійного для різних морфологічних частин стебла та встановлення оптимальних режимів обробки.

Виклад основного матеріалу. Аналіз морфологічної будови стебел льону олійного, а також існуючих методів виділення луб'яного волокна показав, що ефективність первинної переробки значною мірою залежить від ступеню руйнування міжклітинних зв'язків між волокнистими пучками та деревинною частиною стебла.

Результати попередніх досліджень засвідчили перспективність використання трубчастого ультразвукового кавітатора з радіальною модою коливань [1]. Його конструкція забезпечує формування симетричного кавітаційного поля навколо осі вібратора, що дозволяє рівномірно впливати на стебла льону з усіх боків. Поєднання кавітаційного ефекту, механічних радіальних коливань і локальних гідродинамічних ударів сприяє ефективному руйнуванню пектиново-геміцелюлозних зв'язків між волокном і деревинною, водночас зберігаючи цілісність волоконної структури.

Подальше вивчення процесів руйнування міжклітинних зв'язків у стеблах льону олійного під дією ультразвукової кавітації, зокрема із застосуванням трубчастого кавітатора з радіальною модою коливань було спрямовано на дослідження ефективності виділення луб'яного волокна.

З цієї метою визначали відокремлюваність луб'яного волокна льону олійного від деревинної частини стебла, що є одним із ключових показників якості трести. Для цього солону льону олійного

перед проведенням експериментальних досліджень підготували до обробки на трубчастому ультразвуковому кавітаторі з радіальною модою коливань. Підготовка зразків здійснювалася шляхом нарізання стебел на відрізки довжиною 40 мм, що відповідало конструктивним розмірам робочої камери кавітатора. Нарізання проводили за допомогою різача гільйотинного типу, який забезпечує рівномірність та чистоту зрізу, а також мінімізує механічні пошкодження волоконної структури стебел. Використання такого обладнання дозволило отримати зразки з однаковими геометричними параметрами, що є важливою умовою для забезпечення відтворюваності та коректності експериментальних досліджень.

З метою врахування морфологічних особливостей стебла льону олійного та їх можливого впливу на процес відокремлення волокна отримані відрізки було розподілено на три групи: верхівкову, серединну та прикореневу частини стебла. Такий поділ дозволив провести більш детальний аналіз ефективності обробки та оцінити відмінності у процесі руйнування міжклітинних зв'язків у різних зонах стебла.

Після ультразвукової обробки зразки соломи льону олійного піддавали сушінню у сушильній шафі з метою доведення вологості матеріалу до рівня, необхідного для визначення відокремлюваності волокна. Відомо, що для проведення такого визначення оптимальна вологість зразків повинна становити 16–20 % [9]. Сушіння проводили до досягнення зазначеного діапазону вологості, що забезпечувало коректність подальших вимірювань.

Після стабілізації вологості проводили визначення відокремлюваності луб'яного волокна від деревинної частини стебла. Оцінювання здійснювали за методикою, що передбачає механічну обробку підготовлених відрізків та подальший підрахунок ступеня відокремлення волокон [9]. Отримані результати використовували для оцінювання ефективності ультразвукової кавітаційної обробки та її впливу на процес руйнування міжклітинних зв'язків у стеблах льону олійного.

Випробування проводили із варіюванням основних технологічних параметрів процесу ультразвукової кавітації – температури робочого середовища, тривалості обробки та потужності ультразвукового впливу. Такий підхід дозволив оцінити вплив кожного з параметрів на ефективність руйнування міжклітинних зв'язків і, відповідно, на ступінь відокремлюваності луб'яного волокна.

З огляду на те, що стебло льону олійного характеризується неоднорідною морфологічною будовою по довжині, дослідження проводили послідовно для різних його частин. На першому етапі експериментів ультразвуковій кавітаційній обробці піддавали верхівкову частину соломи стебел льону олійного, яка відрізняється меншою щільністю тканин і, як правило, має інші умови зчеплення волокна з деревинною частиною. Це дало можливість оцінити початкові закономірності впливу ультразвукової кавітації на процес відокремлення волокна та визначити характер зміни досліджуваного показника залежно від параметрів обробки (рис. 1).

Найкращий режим ультразвукової кавітаційної обробки верхівкової частини стебел льону олійного – 3хв. при температурі 60 °C та потужності 450 Вт, що забезпечило відокремлюваність волокна на рівні 4,7. Саме така комбінація параметрів створює оптимальний баланс між інтенсивністю кавітаційних процесів і збереженням структури волокна: ультразвукові хвилі ефективно руйнують пектинові зв'язки, але не пошкоджують клітинні стінки. Короткі режими тривалістю 1,5 хв. незалежно від потужності та температури дають лише часткове відокремлення волокна (2,0–3,5 одиниць), оскільки час дії недостатній для повного руйнування міжклітинних зв'язків.

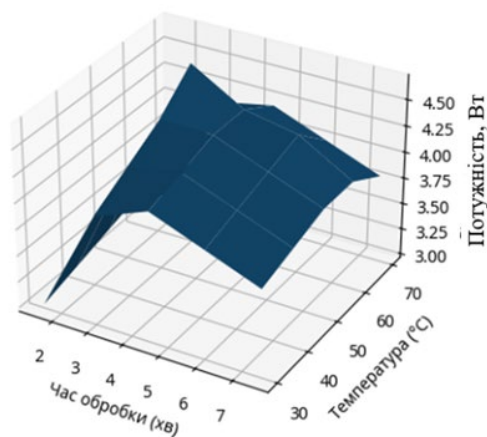


Рис. 1. Залежність відокремлюваності волокон верхівкової частини стебел льону олійного від параметрів ультразвукової кавітаційної обробки

Середні режими тривалістю 4,5 хв. при потужності 250–450 Вт за температури 40–60 °C забезпечують стабільно високі результати (3,5–4,4 одиниці), проте не перевищують оптимальний режим, адже надмірне збільшення часу починає знижувати якість через часткове пошкодження волокна. Довгі режими тривалістю 6–7,5 хв. при потужності 350–500 Вт і температурі 50–70 °C демон-

струють зниження ефективності (3,0–4,0 одиниць), що пояснюється надмірним руйнуванням структури волокна: воно стає ламким і втрачає міцність. Потужність понад 450 Вт при високих температурах не покращує результат, а навпаки призводить до надмірної кавітації, яка руйнує клітинні стінки і знижує якість відокремлення. Таким чином, оптимальним для технологічної обробки верхівкової частини соломи стебел льону олійного є режим середньої тривалості, середньовисокої потужності та помірно високої температури, що забезпечує максимальну ефективність без пошкодження структури волокна.

Аналогічні дослідження проводили для середньої (рис. 2) та прикореневої частин стебел (рис. 3) з метою порівняння отриманих результатів і встановлення залежності відокремлюваності волокон від параметрів ультразвукової кавітаційної обробки.

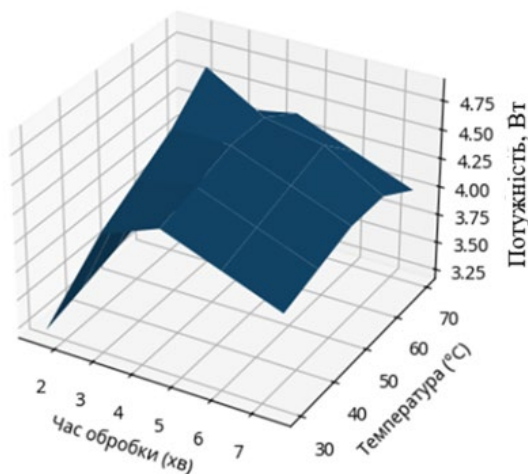


Рис. 2. Залежність відокремлюваності волокон середньої частини стебел льону олійного від параметрів ультразвукової кавітаційної обробки

Результати досліджень, які наведено на рис. 2 свідчать, що при збільшенні часу від 1,5 до 6 хв. відокремлюваність волокон поступово зростала. Максимальне значення показника – 4,8 – було отримано за потужності 450 Вт, при температурі 60 °С та тривалості обробки 6 хв., що свідчить про найбільш ефективне руйнування міжклітинних зв'язків у цих режимах.

Подальше збільшення тривалості обробки до 7,5 хв. не приводило до покращення результатів, а в окремих випадках супроводжувалося незначним зниженням відокремлюваності, що може бути пов'язано з частковим пошкодженням або ущільненням структури волокон під дією надмірної ультразвукової енергії.

Отже, для середньої частини стебел льону олійного найбільш ефективними параметрами ультразвукової кавітаційної обробки є температура близько 60 °С, потужність 450 Вт та тривалість обробки близько 6 хв.

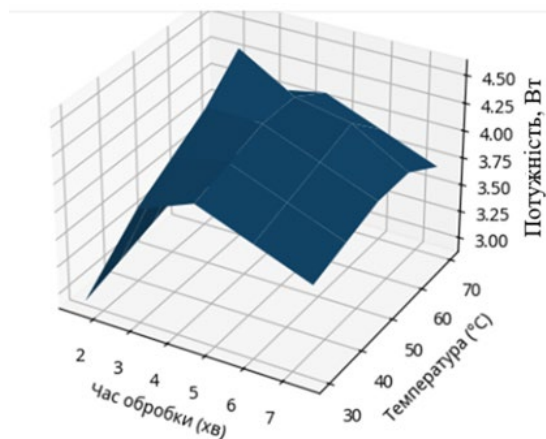


Рис. 3. Залежність відокремлюваності волокон прикореневої частини стебел льону олійного від параметрів ультразвукової кавітаційної обробки

Результати визначення відокремлюваності луб'яного волокна для прикореневої частини стебла льону олійного показали залежність цього показника від тривалості ультразвукової обробки, потужності випромінювання та температури робочого середовища (рис. 3).

Встановлено, що із збільшенням часу ультразвукової дії від 1,5 до 7,5 хв. відокремлюваність волокон зростає, що свідчить про поступове послаблення міжклітинних зв'язків у структурі стебла. Максимальне значення показника – 4,7 – отримано за умов потужності 450 Вт, температури 60 °С та тривалості обробки 7,5 хв.

Отже, для прикореневої частини стебел льону олійного найбільш ефективними умовами ультразвукової кавітаційної обробки є температура близько 60 °С, потужність 450 Вт та тривалість обробки 7,5 хв., за яких забезпечується найбільший ступінь відокремлення луб'яного волокна від деревинної частини стебла.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність застосування трубчастого ультразвукового кавітатора з радіального модою коливань для інтенсифікації процесу відокремлення луб'яного волокна зі стебел льону олійного. Встановлено, що ступінь відокремлюваності волокон залежить від тривалості обробки, температури середовища та потужності ультразвукового впливу.

Експериментально встановлено, що найбільш ефективною є температура близько 60 °С та потужність 450 Вт, за яких забезпечується інтенсивне руйнування пектинових міжклітинних зв'язків без

пошкодження структури волокна. Оптимальна тривалість обробки залежить від морфологічної частини стебла: для верхівкової частини – близько 3 хв., для середньої частини – 6 хв., а для прикореневої частини – 7,5 хв. Збільшення часу обробки понад оптимальні значення не покращує результатів і може призводити до часткового пошкодження волокон.

Отримані результати свідчать, що використання ультразвукової кавітаційної обробки дозволяє підвищити ефективність руйнування міжклітинних зв'язків у стеблах льону олійного, покращити відокремлюваність луб'яного волокна та може бути перспективним напрямом удосконалення технологій первинної переробки луб'яних культур.

Список літератури:

1. Євтушенко А., Луговський О. Ультразвукова кавітаційна обробка стебел льону олійного з метою вилучення технічних конопель. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Т. 359, №6.1. С. 173–178. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-24>
2. The pectin content as a measure of the retting and rettability of flax / W.J. M. Meijer et al. *Industrial Crops and Products*. 1995. Vol. 4, no. 4. P. 273–284. URL: [https://doi.org/10.1016/0926-6690\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0926-6690(95)00041-0)
3. Akin D.E. Linen Most Useful: Perspectives on Structure, Chemistry, and Enzymes for Retting Flax. *ISRN Biotechnology*. 2013. Vol. 2013. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.5402/2013/186534>
4. Голобородько П. А., Саленко О. Ф., Слободяник М. С. Льон і коноплі: технологія вирощування та переробки. Київ: Урожай, 2011. 368 с.
5. Ягелюк С.В., Дідух В.Ф. Напрямки використання продукції переробки льону олійного та льону довгунця. *Товарознавчий вісник*. 2020. Т. 1, №13. С.292–305. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2020-13-25>
6. Development of a smart farming tool to monitor the degree of dew retting of flax stems / A. Reda et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, no.1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12801-1>
7. Євтушенко А. В., Бойко Г. А. Сучасний стан первинної переробки луб'яних культур. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Т. 1, №1(92). С. 316–320. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.43>
8. Bussemaker M. J., Zhang D. Effect of Ultrasound on Lignocellulosic Biomass as a Pretreatment for Biorefinery and Biofuel Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. Vol. 52, no.10. P. 3563–3580. URL: <https://doi.org/10.1021/ie3022785>
9. ТУ У 01.1-05480298-001:2017. Треста льону олійного. Технічні умови. Чинний від 2018-08-28. Вид. офіц. Херсон, 2018. 42 с.

Yevtushenko A.V., Boiko H.A. Zilinskyi A.I. INFLUENCE OF ULTRASOUND CAVITATION TREATMENT PARAMETERS ON THE SEPARATION OF FLAX FIBER FROM OIL FLAX STEM

The article investigates the influence of ultrasonic cavitation treatment parameters on the process of bast fiber separation from oil flax stems. The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of primary processing of bast crops and the search for energy-efficient and environmentally friendly technologies for fiber separation. The morphological structure of oil flax stems is characterized by a complex structure in which fibrous bundles are connected to the woody part by pectin, hemicellulose and lignin compounds. It is the destruction of these intercellular bonds that determines the efficiency of the fiber separation process. A promising way to intensify this process is the use of ultrasonic cavitation, which creates local hydrodynamic shocks and microjets that contribute to the destruction of the intercellular matrix without significant damage to the fibers. The purpose of the study is to determine the influence of the temperature of the environment, the power of ultrasonic radiation and the duration of treatment on the separability of bast fiber from oil flax stems. To conduct the experiment, the stems of oil flax were cut into 40 mm long segments, which corresponded to the dimensions of the working chamber of a tubular ultrasonic cavitator with a radial oscillation mode. The obtained samples were divided into the apical, middle and basal parts. After ultrasonic treatment, the samples were dried to a moisture content of 16–20%, after which the separability of bast fibers from the woody part of the stem was determined.

The study was conducted with varying treatment duration (1.5–7.5 min.), ambient temperature (30–70 °C) and ultrasonic power (200–500 W). It was found that the highest separation of fibers is achieved at a temperature of about 60 °C and a power of 450 W. The optimal treatment duration depends on the part of the stem: for the apical part - 3 min., for the middle part - 6 min., for the basal part - 7.5 min. The results obtained confirm the prospects of using ultrasonic cavitation treatment to increase the efficiency of bast fiber extraction from oil flax stems.

Keywords: oil flax, straw, primary processing, ultrasonic cavitator, separability.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 664.8/9

DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/28>**Строкова Т.М.**<https://orcid.org/0009-0004-4524-8648>

Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

Сірко З.С.<https://orcid.org/0000-0001-5197-9237>

Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

Ващенко В.В.<https://orcid.org/0000-0002-9843-8507>

Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

Костенко О.І.<https://orcid.org/0009-0007-1882-3821>

Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

Овчаренко А.О.<https://orcid.org/0009-0001-6649-2103>

Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

МІКРОБІОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУБЛІМОВАНИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ НА ВИЯВЛЕННЯ ПАТОГЕННИХ МІКРООРГАНІЗМІВ

У статті розглянуті питання, що стосуються мікробіологічних досліджень харчових продуктів на виявлення бактерій *Staphylococcus aureus*, *Clostridium*, *Salmonella*, *Bacillus cereus* та пліснявих грибів і дріжджів. Зазначено, що для умовно-патогенних мікроорганізмів відносять бактерії *Staphylococcus aureus*, *Clostridium*, *Bacillus cereus*, до патогенних мікроорганізмів – *Salmonella*, до мікроорганізмів, що викликають псування харчового продукту – плісняві гриби та дріжджі. Показано, що промислова технологія сублімації гарантує збереження не лише поживних властивостей харчових продуктів, але й безпеку продукції на всіх етапах її виробництва та зберігання. Важливим етапом виготовлення сублімованих харчових продуктів є контроль вхідної сировини та готового продукту. Ця функція відводиться мікробіологічному контролю, який встановлює справжнє походження харчової продукції, а також що ця продукція відповідає всім стандартам якості та безпеки. Для проведення мікробіологічних досліджень були відібрані три дослідні зразки різних харчових сублімованих продуктів, у двох із яких термін зберігання був протермінований. Дослідження проводили у лабораторії хімічних та мікробіологічних досліджень (сектор проведення мікробіологічних досліджень) Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс». Мікробіологічні дослідження проводили з метою встановлення наявності або відсутності у харчових продуктах шкідливих для людини мікроорганізмів: *Staphylococcus aureus*, *Clostridium*, *Salmonella*, *Bacillus cereus* пліснявих грибів та дріжджів. Аналіз випробувань показав, що у всіх дослідних зразках сублімованих харчових продуктів відсутні шкідливі для людини мікроорганізми, зокрема *Staphylococcus aureus*, *Clostridium*, *Salmonella*, *Bacillus cereus*, плісняві гриби та дріжджі. Проведені мікробіологічні дослідження підтверджують ефективність промислової технології сублімації, яка гарантує збереження поживних властивостей продукту та його безпеку під час виробництва та зберігання.

Ключові слова: мікробіологічні дослідження, сублімовані харчові продукти, мікроорганізми *Staphylococcus aureus*, *Clostridium*, *Salmonella*, *Bacillus cereus*, плісняві гриби та дріжджі, результати випробувань.

Постановка проблеми. До мікробіології відносять галузь біології, що вивчає мікроскопічні організми (віруси, бактерії, гриби, археї тощо). Мікробіологія досліджує будову названих мікроорганізмів, фізіологію, генетику та еволюцію, а також їхню роль в екосистемах. Мікробіологічні дослідження мають широке практичне застосування у медицині, харчовій промисловості та охороні довкілля.

У харчовій промисловості технологія промислового виробництва продуктів постійно розвивається та вдосконалюється, що дає можливість отримувати якісні та безпечні продукти, які зберігають свої поживні властивості, енергетичну цінність та смак продукту.

Одним із основних факторів, що відноситься до харчових продуктів, є їх сублімація, що дозволяє зберегти поживні властивості продукту, його енергетичну цінність, безпечність та смакові якості не лише після виготовлення, а й протягом тривалого терміну зберігання. Сублімація включає в себе вакуумне сушіння заморожених продуктів за низьких температур, під час якого вода, яка знаходиться в продукті у вигляді льоду, переходить з твердого агрегатного стану в пару (без рідкої фази). За такої технології значна частина мікроорганізмів у харчових продуктах гине під впливом низьких температур, високого осмотичного тиску, механічної дії кристалів льоду та підвищеної температури в процесі досушування.

Обсяг залишкової мікрофлори залежить від технологічних режимів сушіння, фізико-хімічних властивостей продукту, стійкості мікроорганізмів та їх початкової кількості. Промислова технологія сублімації харчових продуктів зменшує вологу в продукті, забезпечує збереження його структури та меншу схильність до мікробіологічного забруднення. Порушення технологічних режимів виготовлення сублімованих продуктів, зберігання сировини, напівпродуктів та готової продукції може стати причиною розвитку шкідливих мікроорганізмів і, як правило, мікробного псування продукту (прокисання, згіркнення, гниття та пліснявіння). З метою виготовлення якісної продукції, що відповідає встановленим нормам, необхідно вчасно та кваліфіковано здійснювати мікробіологічний контроль.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі переваги сублімованих харчових продуктів у тому, що вони зберігають свої поживні властивості, енергетичну цінність, безпеку та смакові якості продукту [1, 2]. Сублімація включає в себе сушіння заморожених продуктів за низьких температур, під час якого вода, яка знаходиться в про-

дукті у вигляді льоду, переходить із твердого агрегатного стану в пару минаючи рідку фазу [3, 4]. Технологія сублімації харчових продуктів забезпечує зменшення вологи в продукті, збереження його структури та меншу схильність до мікробіологічного забруднення [5, 6].

Досить важливим етапом виготовлення сублімованих харчових продуктів є постійний лабораторний контроль вхідної сировини та готового продукту [7-16]. До мікробіологічного контролю відносять дослідження на фізико-хімічні, хіміко-технологічні та органолептичні показники. До фізико-хімічних методів дослідження можна віднести вимірювання фізичних властивостей продукту та його хімічний аналіз. Хіміко-технологічні показники включають визначення наявності мікробіологічного забруднення у харчовому продукті [17]. Відомо, що мікробіологічне забруднення продукту може відбуватися на різних етапах промислового виробництва:

- під час вирощування сировини: мікроорганізми присутні у повітрі, воді та ґрунті;
- під час перероблення продукту: неналежна гігієна або обробка може призвести до забруднення харчового продукту патогенними мікроорганізмами;
- під час транспортування та зберігання: неналежні умови транспортування та зберігання можуть сприяти розмноженню мікроорганізмів у харчовому продукті.

Вчасно проведений мікробіологічний контроль та знешкодження наявних мікроорганізмів гарантує безпеку харчової продукції [18].

З огляду на викладене, дуже важливо мати стабільні мікробіологічні показники сублімованих харчових продуктів, які виготовлені з дотриманням технологічного процесу промислового виробництва та умов зберігання.

Постановка завдання. Метою статті є мікробіологічні дослідження сублімованих харчових продуктів на виявлення патогенних мікроорганізмів.

Виклад основного матеріалу. Мікробіологічні випробування проводили у лабораторії хімічних та мікробіологічних досліджень (сектор проведення мікробіологічних досліджень) Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс» (УкрНДІ «Ресурс»). Мікробіологічні дослідження проводили з метою встановлення наявності або відсутності у харчових продуктах шкідливих для людини мікроорганізмів: *Staphylococcus aureus*, *Clostridium*, *Salmonella*, *Bacillus cereus* плісняві гриби та дріжджі. Дослідження проводились за стандартними методиками.

Для досліджень були відібрані зразки наступних сублімованих харчових продуктів:

- сублімовані макарони з м'ясом курки та овочами, виробник Ledova Slavna strava (термін придатності один рік шість місяців), протерміновані три місяці;
- сублімований суп нуттовий з м'ясом курки та овочами, виробник Ledova Slavna strava (термін придатності один рік сім місяців), протермінований два місяці;
- сублімований суп гречаний із м'ясом курки, виробник Ledova Slavna strava (термін придатності два роки).

Дослідження на виявлення *Staphylococcus aureus*, проводили згідно ГОСТ 10444.2-94 «Продукты пищевые. Метод выявления и определения *Staphylococcus aureus*,». Даний метод використовують для виявлення *Staphylococcus aureus* у певній наважці продукту чи з розведення наважки та характеризується ростом типових колоній на селективно-діагностичних середовищах (агар Байд-Паркера, жовточно-сольовий агар тощо). Під час мікроскопії мазків видно грам позитивні коки, ідентифікація здійснюється щодо здатності продукувати лецитиназу навколо типових колоній та коагулювати цитратну плазму кролика під впливом ферменту коагулази. Результати досліджень на виявлення *Staphylococcus aureus* наведені у табл. 1.

З аналізу таблиці 1 можна зробити висновок про відсутність *Staphylococcus aureus* у зразках, які досліджувалися, що підтверджує високу якість цих продуктів харчування.

Анаеробні бактерії з роду *Clostridium* (сульфітредукуючі клостридії) редукують сульфід, що характеризується почорнінням сульфідного середовища (агар Вільсон-Блера). Грампозитивні каталазо-негативні палички утворюють яйцевидні, шароподібні центральні, субтермінальні та термінальні спори. Дослідження проводили згідно з вимогами ДСТУ ISO 7937-2006 «Мікробіологія харчових продуктів та кормів для тварин. Горизонтальний метод визначення кількості *Clostridium perfringens*». Техніка підрахування колоній базується на виявленні в 1г/см³ мезофільних клостридій.

Сульфитредуючі клостридії є анаеробами, які розвиваються в умовах, де відсутній кисень, або його концентрація дуже низька. Тому виявлення бактерій з роду *Clostridium* у харчовому продукті свідчить про погане пакування, не дотримання режимів транспортування та зберігання або пошкоджену упаковку.

Результати досліджень на виявлення бактерій з роду *Clostridium* наведені у табл. 2.

Із аналізу таблиці 2 можна зробити висновок про відсутність бактерій з роду *Clostridium* у дослідних

Таблиця 1

Результати досліджень на виявлення *Staphylococcus aureus*

Кількість проведених досліджень	Зразок 1. Суп гречаний з м'ясом курки, виробник Ledova Slavna strava.	Зразок 2. Макарони з м'ясом курки та овочами сублімованими, виробник Ledova Slavna strava.	Зразок 3. Суп нуттовий з м'ясом курки та овочами сублімований, виробник Ledova Slavna strava.	Нормативний документ
Staphylococcus aureus в 1г				
Результат 1	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ГОСТ 10444.2-94
Результат 2	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ГОСТ 10444.2-94
Результат 3	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ГОСТ 10444.2-94
Staphylococcus aureus в 0,1г				
Результат 1	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ГОСТ 10444.2-94
Результат 2	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ГОСТ 10444.2-94
Результат 3	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ГОСТ 10444.2-94
Staphylococcus aureus в 0,01г				
Результат 1	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ГОСТ 10444.2-94
Результат 2	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ГОСТ 10444.2-94
Результат 3	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ГОСТ 10444.2-94

Таблиця 2

Результати досліджень на виявлення бактерій з роду *Clostridium*

Кількість проведених досліджень	Сульфитредуючі клостридії в 0,01г			Нормативний документ
	Зразок № 1. Суп гречаний з м'ясом курки сублімований.	Зразок № 2. Макарони з м'ясом курки та овочами сублімованими.	Зразок № 3. Суп нуттовий з м'ясом курки та овочами сублімований.	
Результат 1	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ДСТУ ISO 7937:2006
Результат 2	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ДСТУ ISO 7937:2006
Результат 3	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ДСТУ ISO 7937:2006

сублімованих продуктах, що свідчить про дотримання умов зберігання та транспортування харчових продуктів та належне їх пакування.

Досить важливим показником під час мікробіологічних досліджень є виявлення дріжджів та плісєні. Дослідження проводили згідно ДСТУ 8447:2015 «Продукти харчові. Методи виявлення дріжджів та плісєні».

Для визначення кількості дріжджів і пліснявих грибів висівали певну кількість продукту або його розведення в селективне агаризоване середовище (агар Сабура) та культивували посіви за температури $24 \pm 1^\circ\text{C}$ протягом п'яти діб з наступним підрахунком всіх колоній, типових за макро-та мікроскопічною морфологією та перераховували їх кількість на $1\text{г}/\text{см}^3$.

Результати проведених досліджень наведені у табл. 3-5.

Аналіз отриманих результатів під час проведених досліджень дає можливість констатувати про відсутність пліснявих грибів та дріжджів у всіх дослідних зразках. Результати досліджень (таблиці 3-5) свідчать про придатність до споживання харчових продуктів навіть з протермінованим терміном придатності. Це дає можливість стверджувати про можливість продовження терміну придатності до споживання даних продуктів харчування.

Збудниками харчових токсичних інфекцій займають бактерії роду *Salmonella*, які під час мікроскопії мають форму паличок із заокругленими кінцями, грамнегативні факультативні анаероби, які можуть рости як за наявності кисню, так і в його відсутності на звичайних поживних середовищах за температури $36 \pm 1^\circ\text{C}$. Найбільш поширеним способом передачі сальмонельозу – вживання забруднених або неякісних продуктів харчування, таких як яйця, сир, неякісне м'ясо, птиця і т. і. Діагностику дослідних зразків харчових продуктів проводили на відповідність чинному стандарту ДСТУ EN 12824:2004 «Мікробіологія харчових продуктів та кормів для тварин. Горизонтальний метод виявлення *Salmonella*». Даний метод дослідження передбачає:

- попереднє концентрування у неселективному рідкому середовищі;
- концентрування у селективному рідкому середовищі;
- посів у чашки Петрі та розпізнавання культур – виявлення характерного росту колоній на діагностичних середовищах;
- підтвердження випробувань – за допомогою відповідних біохімічних тестів.

Бактерії роду *Salmonella* викликають харчові токсичні інфекції у разі можливого їх розмно-

Таблиця 3

Результати досліджень на виявлення пліснявих грибів та дріжджів

Зразок 1.Суп гречаний з м'ясом курки сублімований.	Кількість колоній, що вирости на чашках Петрі				Плісняві гриби,дріжджі (КУО/г)
	10 ⁻¹		10 ⁻²		
	1чашка	2чашка	1чашка	2чашка	
1	0	0	0	0	<1·10 ¹
2	0	0	0	0	<1·10 ¹
3	0	0	0	0	<1·10 ¹

Таблиця 4

Результати досліджень на виявлення пліснявих грибів та дріжджів

Зразок 2. Макарони з м'ясом курки та овочами сублімованими.	Кількість колоній, що вирости на чашках Петрі				Плісняві гриби,дріжджі (КУО/г)
	10 ⁻¹		10 ⁻²		
	1чашка	2чашка	1чашка	2чашка	
1	0	0	0	0	<1·10 ¹
2	0	0	0	0	<1·10 ¹
3	0	0	0	0	<1·10 ¹

Таблиця 5

Результати досліджень на виявлення пліснявих грибів та дріжджів

Зразок 3.Суп нуттовий з м'ясом курки та овочами сублімований.	Кількість колоній, що вирости на чашках Петрі				Плісняві гриби,дріжджі (КУО/г)
	10 ⁻¹		10 ⁻²		
	1чашка	2чашка	1чашка	2чашка	
1	0	0	0	0	<1·10 ¹
2	0	0	0	0	<1·10 ¹
3	0	0	0	0	<1·10 ¹

ження у харчових продуктах, під час недотримання правил особистої гігієни працівниками підприємств. Якщо у харчовому продукті виявлено бактерії роду *Salmonella*, це свідчить про те, що для виробництва цього продукту була використана недоброякісна сировина, або про порушення технологічних режимів виробництва.

Результати проведених досліджень з виявлення бактерій роду *Salmonella* наведені у табл. 6.

За результатами досліджень з виявлення бактерій роду *Salmonella* отримано негативні показники, що свідчить про високу якість дослідних зразків сублімованих харчових продуктів.

Підтвердження наявності в посівах бактерій *Bacillus cereus* визначали згідно ДСТУ 8040:2015

«Продукти харчві. Метод виявлення та визначення *Bacillus cereus*».

Виявляти *Bacillus cereus* можна в певній наважці продукту, або підраховувати його кількість та виражати результат, як колоніє утворюючі одиниці в г/см³ (КУО г/см³).

Bacillus cereus, що виявлений в залишковій мікрофлорі, містить потенційну небезпеку і може бути причиною отруєння. У 1г консервованого харчового продукту допускається не більше 100 клітин *Bacillus cereus*.

Результати випробувань дослідних зразків сублімованих харчових продуктів на виявлення *Bacillus cereus* наведені у табл. 7-9.

Результати досліджень із таблиць 7-9 показали, що в посівах не виявлено бактерій *Bacillus*

Таблиця 6

Результати проведених досліджень з виявлення бактерій роду *Salmonella*

Кількість проведених досліджень дослідних зразків.	Патогенні мікроорганізми в т.ч. <i>Salmonella</i> в 25г			Нормативний документ.
	Зразок № 1. Суп гречаний з м'ясом курки сублімований.	Зразок № 2. Макарони з м'ясом курки та овочами сублімованими.	Зразок № 3. Суп нуттовий з м'ясом курки та овочами сублімований.	
Результат 1	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ДСТУ EN 12824:2004
Результат 2	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ДСТУ EN 12824:2004
Результат 3	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	ДСТУ EN 12824:2004

Таблиця 7

Результати випробувань дослідних зразків сублімованих харчових продуктів на виявлення *Bacillus cereus*

Зразок № 1.Суп гречаний з м'ясом курки сублімований.	Кількість колоній, що вирости на чашках Петрі.						Виявлено Bacillus cereus (KYO/г)
	10 ⁻¹		10 ⁻²		10 ⁻³		
	1чашка	2чашка	1чашка	2чашка	1чашка	2чашка	
1	0	0	0	0	0	0	<1·10 ¹
2	0	0	0	0	0	0	<1·10 ¹
3	0	0	0	0	0	0	<1·10 ¹

Таблиця 8

Результати випробувань дослідних зразків сублімованих харчових продуктів на виявлення *Bacillus cereus*

Зразок № 2. Макарони з м'ясом курки та овочами сублімованими.	Кількість колоній, що вирости на чашках Петрі.						Виявлено <i>Bacillus cereus</i> (КУО/г)
	10 ⁻¹		10 ⁻²		10 ⁻³		
	1чашка	2чашка	1чашка	2чашка	1чашка	2чашка	
1	0	0	0	0	0	0	<1·10 ¹
2	0	0	0	0	0	0	<1·10 ¹
3	0	0	0	0	0	0	<1·10 ¹

Таблиця 9

Результати випробувань дослідних зразків сублімованих харчових продуктів на виявлення *Bacillus cereus*

Зразок № 3.Суп нуттовий з м'ясом курки та овочами сублімований.	Кількість колоній, що вирости на чашках Петрі.						Виявлено Bacillus cereus (КУО/г)
	10 ⁻¹		10 ⁻²		10 ⁻³		
	1чашка	2чашка	1чашка	2чашка	1чашка	2чашка	
1	0	0	0	0	0	0	<1·10 ¹
2	0	0	0	0	0	0	<1·10 ¹
3	0	0	0	0	0	0	<1·10 ¹

cereus, а отже це підтверджує високу якість харчових продуктів, придатних для тривалого зберігання.

Висновки. 1. Аналіз літературних джерел показав, що сублімація є одним із найбільш ефективних методів збереження поживних та енергетичних властивостей харчових продуктів, зокрема мінералів, вітамінів та білків.

2. Термін зберігання сублімованих харчових продуктів значною мірою залежить від ряду ключових мікробіологічних, фізико-хімічних та орга-

нолептичних показників, які визначають якість та безпечність продукції.

3. Результати проведених мікробіологічних досліджень сублімованих харчових продуктів свідчать про відсутність патогенних мікроорганізмів, зокрема *Staphylococcus aureus*, *Clostridium*, *Salmonella*, *Bacillus cereus*, плісняві гриби та дріжджі, що підтверджує ефективність технології сублімації, яка гарантує збереження не лише поживних властивостей, але й безпеку продукції на всіх етапах її виробництва та зберігання.

Список літератури:

1. Сублімовані продукти – цінний подарунок науки люду. 2021. URL: <https://uk.ellascokies.com/zdorove/121709-sublimirovannye-produkty-cenny-podarok-naukichelovechestvu.html> (дата звернення – 12.12.2025).
2. Борзенко В., Пташук С. Харчі для космонавтів стають доступними. Ідеї & тренди. 2016. № 2. С. 7-11.
3. Соломон А.М., Казмірук Н.М., Тузова С.Д. Мікробіологія харчових виробництв: навч. пос. Вінниця: РВВ ВНАУ, 2020. 312 с.
4. Рагулін Д.О. Сублімаційна сушка – прогресивний спосіб сушіння. Збірник тез доповідей наукової конференції Української інженерно-педагогічної академії. Харків, 2022. С. 86-87.
5. Пількевич Н.Б., Боярчук О.Д. Мікробіологія харчових продуктів: навч. пос. Луганськ: Альма-матер, 2008. 152 с.
6. Ковнір А.О., Рачинська З.П. Експертиза та ідентифікація сублімованої продукції. Актуальні питання розвитку науки та забезпечення якості освіти у ХХІ столітті: матеріали VI Міжнародної наукової студентської конференції за підсумками науково-дослідних робіт студентів за 2022 рік (25 квітня 2023). Полтава: ПУЕТ, 2023. С.514-516.
7. ДСТУ 8446:2015. Продукти харчові. Методи визначення кількості мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів. [Чинний від 2015-09-28]. Київ: Держспоживстандарт України, 2015. 16с.
8. ДСТУ 8040:2015. Продукти харчові. Метод виявлення та визначення *Bacillus cereus*: [Чинний від 2015-06-22]. Київ: Держспоживстандарт України, 2015. 16с.
9. ДСТУ 8447:2015. Продукти харчові. Метод визначення дріжджів і плісневих грибів: [Чинний від 2015-09-28]. Київ: Держспоживстандарт України, 2015. 14с.
10. ДСТУ 7963:2015. Продукти харчові. Готування проб для мікробіологічних аналізів: [Чинний від 2015-06-22]. Київ: Держспоживстандарт України, 2015. 15с.
11. ДСТУ 4939:2008. Продукти перероблення фруктів та овочів, консерви м'ясні та м'ясо-рослинні. Методи визначення вмісту хлоридів: [Чинний від 2008-03-26]. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 16с.
12. ДСТУ EN 12824:2004. Мікробіологія харчових продуктів і кормів для тварин. Горизонтальний метод виявлення *Salmonella*: [Чинний від 2004-04-30]. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 16с.
13. Про затвердження Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії: наказ Міністерства охорони здоров'я України від 03.09.2017 р. № 1073. Законодавство України: сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17#Text>.
14. ISO 7937:2004, IDT: ДСТУ ISO 7937:2006. Мікробіологія харчових продуктів і кормів для тварин. Горизонтальний метод визначення кількості *Clostridium Perfringens*. Техніка підрахування колоній. [Чинний від 2006-09-09]. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 12с.
15. ГОСТ 30518-97. Продукты харчові. Методи виявлення та визначення кількості бактерій групи кишкових паличок (коліформних бактерій). [Чинний від 2001-04-24]. Київ: Держспоживстандарт України, 2001. 10с.
16. ГОСТ 10444.2-94. Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества *Staphylococcus aureus*. [Чинний від 1994-03-07]. Київ: Держспоживстандарт України, 1994. 17с.
17. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 11.08.2006 № 559 Про затвердження методичних вказівок «Організація контролю і методи виявлення бактерій *Listeria monocytogenes* у харчових продуктах та продовольчій сировині». 2006. URL: <https://zakononline.com.ua> (дата звернення 19.06.2025).
18. Піценко А.О., Горячова О.О. Безпечність харчової продукції як інструмент продовольчої безпеки. Актуальні питання розвитку науки та забезпечення якості освіти у ХХІ столітті: матеріали VI Міжнародної наукової студентської конференції за підсумками науково-дослідних робіт студентів за 2022 рік (25 квітня 2023). Полтава: ПУЕТ, 2023. С.526-529.

Strokova T.M., Sirko Z.S., Vashchenko V.V., Kostenko O.I., Ovcharenko A.O. MICROBIOLOGICAL STUDIES OF FROZEN FOOD PRODUCTS FOR THE DETECTION OF PATHOGENIC MICROORGANISMS

The article considers issues related to microbiological studies of food products for the detection of bacteria Staphylococcus aureus, Clostridium, Salmonella, Bacillus cereus and mold fungi and yeast. It is noted that for opportunistic microorganisms, Staphylococcus aureus, Clostridium, Bacillus cereus are included, pathogenic microorganisms – Salmonella, and microorganisms that cause spoilage of food products – mold fungi and yeast. It is shown that industrial sublimation technology guarantees the preservation of not only the nutritional properties of food products, but also the safety of products at all stages of its production and storage. An important stage in the manufacture of sublimated food products is the control of incoming raw materials and the finished product. This function is assigned to microbiological control, which establishes the true origin of food products, as well as that this product meets all quality and safety standards. Three test samples of various sublimated food products were selected for microbiological studies, two of which had an expired shelf life. The research was conducted in the laboratory of chemical and microbiological research (microbiological research sector) of the Ukrainian State Scientific Research Institute "Resurs". Microbiological research was conducted to establish the presence or absence of microorganisms harmful to humans in food products: Staphylococcus aureus, Clostridium, Salmonella, Bacillus cereus, mold fungi and yeast. The analysis of the tests showed that all the experimental samples of freeze-dried food products did not contain microorganisms harmful to humans, in particular Staphylococcus aureus, Clostridium, Salmonella, Bacillus cereus, mold fungi and yeast. The conducted microbiological research confirms the effectiveness of the industrial sublimation technology, which guarantees the preservation of the nutritional properties of the product and its safety during production and storage.

Keywords: microbiological research, freeze-dried food products, microorganisms Staphylococcus aureus, Clostridium, Salmonella, Bacillus cereus, mold fungi and yeast, test results.

Дата першого надходження статті до видання: 03.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

ТРАНСПОРТ

УДК 656.259

DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/29>

Бех Я.П.

<https://orcid.org/0009-0005-6697-8727>

Український державний університет науки і технологій

РЕЗЕРВУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Проведено моделювання гібридного живлення із сонячною електростанцією при змінних умовах сонячного випромінювання, зроблено акценти на взаємодії між фотоелектричною системою, акумуляторами, інвертором, контролером і алгоритмом керування.

Для оцінки стабільності системи були проаналізовані різні погодні умови (сонячно, хмарно, шторм, зима).

Результати підтверджують здатність системи підтримувати стабільну напругу постійного струму та безперервне живлення. Зафіксовано майже оптимальне відстеження потужності. Однак його чутливість до шуму і затінення свідчить про необхідність більш адаптивних підходів.

Зимове моделювання показало зниження генерації струму, незважаючи на вищу напругу панелі, що підкреслює важливість адаптивності управління енергією та навантаженням.

Досліджено використання альтернативної енергії на залізничному транспорті, що також дозволяє дотримуватись стратегій збереження енергії та зменшення шкідливих викидів вуглекислого газу.

Досліджено використання тягових потужностей залізниць, які можуть широко використовувати нові та відновлювані джерела енергії, не пов'язані з тягою, яка також може використовуватись у великих обсягах. Електрична енергія, отримана з нових та відновлюваних джерел енергії, також може використовуватись в широкому спектрі.

Враховано активний розвиток напрямку сонячної енергії у багатьох країнах.

Розглянута модернізація системи електропостачання залізничної автоматики. Пропонується використовувати сонячні панелі та мережевий інвертор з акумулятором або без нього. Розглянуто модернізацію системи резервного живлення залізничної автоматики та телекомунікаційних пристроїв. Проведено оцінку електромагнітної сумісності системи відновлюваної енергетики.

В залізничній енергетичній системі пристрої з автоматизації та телемеханіки належать до першої категорії і вважаються одними з основних споживачів. Тому їх слід забезпечити джерелом гарантованого живлення.

Основна мета роботи – розвинути та продемонструвати модульну, масштабовану сонячну генераторну систему, що підвищує енергетичну стійкість і доступ до чистої розподіленої енергії – особливо для застосування в регіонах як Україна, де надійність енергетичної інфраструктури є критичною.

Ключові слова: сонячні панелі, інвертор, сонячна енергія, залізнична автоматика, симуляція, моделювання, резервне живлення.

Постановка проблеми. Завдяки розробці нових технологій вартість сонячних панелей та перетворювачів швидко знижується. Відновлювана електроенергія в деяких країнах дає електроенергію за тими ж або нижчими цінами, що і традиційні викопні типи палива. Сонячна енергія може стати однією з головних, бо це чисте, невичерпне джерело енергії, і найближчим часом очі-

кується дефіцит палива традиційної енергетики [4, с. 2].

Залізничний транспорт має унікальні конкурентні переваги у використанні нових і відновлюваних джерел енергії [1, с. 201], що проявляються у двох ключових аспектах:

Електроенергія, що використовується для руху поїздів, сприяє диверсифікації джерел виробни-



цтва електроенергії. Окрім традиційних вугільних і гідроенергетичних ресурсів, залізниця може активно використовувати енергію з альтернативних джерел, таких як біомаса, вітер, сонце, морські припливи, геотермальні ресурси, водень тощо.

Залізнична інфраструктура включає велику кількість станцій, що споживають значні обсяги енергії. Це дозволяє ефективно застосовувати електричну та теплову енергію, отриману з нових і відновлюваних джерел, у масштабах всієї галузі.

Таким чином, розвиток використання екологічно чистих енергетичних ресурсів на залізницях сприяє енергозбереженню, зниженню рівня шкідливих викидів і загальному скороченню вуглецевого сліду залізничного транспорту. Це дає змогу залізницям стати лідерами у впровадженні сталих енергетичних рішень для великомасштабних перевезень [3, с. 67].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні електричні системи все частіше використовують відновлювані джерела енергії джерела енергії як основне або додаткове джерело енергії.

Сонячні та вітрові електростанції допомагають зменшити залежність від традиційне паливо, таке як вугілля або нафта. Проте, на жаль, ефективність сонячної енергетичної системи сильно залежить від кількох факторів, а саме: час доби, хмарність, сезонність, та атмосферні умови. Ці впливи ускладнюють прогнозування виробництва енергії та інтеграція сонячної енергії електростанцій в загальну енергетичну систему. Перевага гібридних сонячних електростанцій полягає у використанні резервних систем зберігання, що компенсують нестабільність генерації. Використання таких конфігурацій потребує оптимізації під умови динамічної змінної сонячної активності.

Окрім того, що сонячні електростанції виробляють екологічно чистішу енергію, ніж дизельна, вони також можуть пропонувати електроенергію за нижчою вартістю порівняно з традиційними джерелами [2, с. 997].

До 2038 року Deutsche Bahn планує повністю перейти на використання відновлюваних джерел енергії [1, с. 202].

У Швейцарії почали встановлювати сонячні батареї безпосередньо на залізничних коліях.

У районі Переяслав-Хмельницька, відкрита найбільша сонячна електростанція в Україні, панелі якої розташовані на дахах будинків.

Потужність електростанції становить 12,4 мегават. За приблизними підрахунками, вона

може виробляти 15 мільйонів кіловат-годин на рік. На зараз, йде використання в приватному бізнесі, але такі проекти можуть бути застосовані й на залізниці [3, с. 66].

Постановка завдання. Метою статті є впровадження резервного живлення посту ЕЦ, який звичайно живиться від тягових підстанцій та автономних високовольтних ліній сигналізації, централізації і блокування 6/10 кВ на електрифікованих залізницях, оскільки є споживачем електроенергії першої особливо важливої категорії. Пости ЕЦ застосовуються для систем диспетчерської станційної централізації, що робить їх важливим вузлом Об'єктів критичної інфраструктури (залізниця).

Сонячні батареї дозволяють забезпечити не тільки резервне електропостачання споживачів залізничної автоматики, але й накопичувати енергію та забезпечувати внутрішні потреби залізничних станцій та постів ЕЦ, такі як освітлення, електродвигуни, охолодження, вентиляція та опалення. Дизель-генератори використовуються як резервні лінії, але з розвитком електромереж вони перестали використовуватися при будівництві нових постів або при модернізації.

Виклад основного матеріалу. Системи електропостачання класифікуються наступним чином:

- за типом джерела електроенергії можна поділити на електрохімічні, дизель-електричні, атомні тощо;
- по конфігурації – централізовані, децентралізовані, комбіновані;
- за родом і частотою струму – постійного струму, змінного струму 50 Гц, змінного струму 400 Гц та ін.;
- за кількістю фаз – одно-, дво-, три-, багатофазні;
- за режимом нейтралі — із ізольованою нейтраллю, глухозаземленою нейтраллю, компенсованою нейтраллю тощо.

За надійністю електропостачання – забезпечення споживачів 1 (1А, 1Б, 1В), 2, 3 категорій надійності, забезпечення змішаних споживачів.

За призначенням – це системи автономного, резервного, аварійного, чергового електропостачання.

За рівнем мобільності – стаціонарні, мобільні, ті, які пересуваються, такі що носяться.

За приналежністю до основного споживача – СЕС автомобіля, танка, гелікоптера, супутника тощо.

Відповідно до проведеного аналізу найчастіше виходять з ладу:

- 30,5 % – магнітні пускачі (контактори);
- 19,6 % – захисні автомати;
- 18,5% – запобіжники;
- 13 % – монтаж;
- 7% – зарядні прис- рої;
- 5,4% – тумблери і пакетні вимикачі.

Головними та необхідними елементами засобів залізничної автоматики та телемеханіки є живильні панелі на постах ЕЦ. У разі їх поломки може статися повна відмова в роботі пристроїв електричної централізації та масових затримок поїздів, що не повинно бути допустиме.

Для перевірки продуктивності фізичної моделі системи відновлюваного електропостачання для залізничної автоматики були обрані сонячні панелі монокристалічні NEON® R 30RS-BB та інвертор Huawei SUN2000-30KTL-M3. Характеристики інвертора Huawei наведені в таблиці 1, а характеристики сонячних панелей наведені в таблиці 2. Вони були обрані для тестування.

Кожен інвертор має свій унікальний діапазон максимальної потужності (УДМП), як зазначено в техніці інвертора. Цей параметр визначає напругу, при якій визначається максимальна точка потужності. Іншим важливим параметром є мінімальна початкова напруга інвертора, яка означає напругу, при якій інвертор ініціює та починає генерувати енергію. У приведеному сценарії діапазон УДМП становить 200-1000 В, мінімальне значення – 200 В. Обидва ці параметри відіграють ключову роль у визначенні конфігурації та кількості з'єднаних сонячних панелей.

Таблиця 1

Характеристики інвертора Huawei SUN2000-30KTL-M3

Параметр	Значення
Клас потужності мережевого інвертора	30000 W
Кількість УДМП-трекерів	4
Максимальна вхідна потужність постійного струму від СП	45000 W
Діапазон постійної напруги від СП	200...1100 V
Робочий діапазон УДМП	200...1000 V
Максимальний струм від СП для кожного входу	26 A
Кількість записів у трекері УДМП	3
Максимальна вихідна потужність динаміка	33000 W
Максимальний вихідний струм змінного струму	48 A
Максимальна ефективність	98.7 %
Робоча температура	-25... +60°C

Температурні коефіцієнти дозволяють розраховувати напругу та потужність, що генеруються сонячними панелями в екстремальних умовах,

припускаючи постійне значення сонячної радіації. В Україні панелі можуть працювати в діапазоні температур від -25 до +60°C, тому розрахунки проводяться для наступних екстремальних умов.

Таблиця 2

Характеристики сонячної панелі NEON® R 30RS-BB

Параметр	Значення
Модель	LG350Q1C-A5
Максимальна потужність (P_{max})	350 W
Максимальна напруга живлення (V_{mp})	36.1 V
Струм при максимальній потужності акумулятора (I_{mp})	9.7 A
Напруга холостого ходу (V_p)	42.7 V
Струм короткого замикання (I_{sc})	10.77 A
Максимальна напруга системи	1000 V
Температурний коефіцієнт I_p , V_{oc} , P_{max}	+0.04 %, -0.24 %, -0.30 % /C

Максимальний струм, який може генерувати одна сонячна панель, можна розрахувати за формулою:

$$I = I_p [1 + (T - 25) \alpha / 100], \quad (1)$$

I – значення струму сонячної панелі на 60°C;

I_p – значення струму за стандартних тестових умов, яке зазначено в характеристиці модуля (10.77 A);

T – максимальна температура (60°C);

α – температурний коефіцієнт I_p (0.04 %/C)

$$I = 10,77 \cdot (1 + (60 - 25) \cdot 0,04/100) = 10,92 \text{ A}$$

На відміну від струму, напруга, що створюється сонячними панелями, зростає зі зниженням температури. Таким чином, розрахунок проводиться для мінімального значення температури -25°C. При розрахунках враховується температурний коефіцієнт напруги холостого ходу. Максимальне значення напруги розраховується за формулою:

$$V = V_p [1 + (T - 25) \beta / 100], \quad (2)$$

де V – значення напруги при -25°C; V_p – напруга холостого ходу (42,7 В); T – мінімальна робоча температура (-25°C), β – температурний коефіцієнт (-0,24 % / C).

$$V = 42,7 \cdot (1 + (-25 - 25) \cdot (-0,24/100)) = 47,8 \text{ В}$$

Розрахунок показує, що для інвертора потужністю 30 кВт перший вхід трекера ДМП не повинен містити більше двох паралельно з'єднаних сонячних панелей, тоді як для другого входу можливе лише послідовне підключення. Це пояснюється тим, що при паралельному з'єднанні струми підсумовуються. При проектуванні та налаштуванні сонячної електростанції необхідно врахо-

увати вказані обмеження щодо кількості та типу підключення сонячних панелей, а також максимальні значення струму та напруги для кожного входу трекера УДМП.

Фотоелектрична система являє собою складну комбінацію компонентів, кожен з яких відіграє ключову роль у використанні сонячної енергії та перетворенні її на корисну електричну енергію. Система складається з:

- сонячні панелі: на передньому краї перетворення енергії сонячні панелі є основою системи, використовуючи фотоелектричний ефект для перетворення падаючого сонячного випромінювання на електричну енергію. Їхня основна функція полягає у забезпеченні постійної напруги постійного струму, що формує основу для подальшої роботи системи.

- інвертор з IGBT-транзисторами: центральним елементом функціональності системи є інвертор, побудований з ізольованих біполярних транзисторів (IGBT), який очолює перетворення постійної напруги від сонячних панелей на змінну напругу. IGBT-транзистори, відомі своєю швидкою реакцією та надійними можливостями обробки струму, слугують стрижнем у цьому трансформаційному процесі.

- ШІМ-контролер: ШІМ-контролер виступає в ролі керуючої системи, генеруючи сигнали широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для регулювання IGBT-транзисторів. Модулюючи ширину імпульсів, ці сигнали ретельно диктують інтервали вмикання та вимикання транзисторів, тим самим керуючи контрольованою зміною вихідної напруги та струму.

- LCL-фільтр: розташований після інвертора, LCL-фільтр виконує вирішальну роль в уточненні вихідної змінної напруги та стабілізації цілісності сигналу системи. Його ретельний механізм фільтрації забезпечує ослаблення небажаних компонентів, сприяючи уточненню та стабільності вихідного сигналу.

- підвищувальний перетворювач постійного струму в постійного струму: є важливим інстру-

ментом оптимізації, підвищувальний перетворювач постійного струму в постійного струму сприяє підвищенню рівнів напруги, оптимізуючи вихідні параметри системи для оптимальної продуктивності. Завдяки вмілому керуванню рівнями напруги цей пристрій сприяє безперебійній передачі максимальної вихідної потужності.

Висновки. Використовуючи симуляцію для моделювання та аналізу системи, були отримані результати, що дають детальне розуміння її операційної динаміки. Ці змодельовані результати ретельно поєднуються з реальними вимірюваннями, що дозволяє провести комплексну перевірку характеристик продуктивності системи. Завдяки такому інтегративному підходу отримується глибше розуміння поведінки та ефективності системи, що закладає основу для прогресу у використанні сонячної енергії та сталого виробництва електроенергії.

Таким чином, результати моделювання підтверджують ефективність гібридної фотоелектричної системи з точки зору стабільного, енергоефективного електропостачання, стійкого при змінних сонячних умовах. Запропонована модель може служити як фундамент для подальших досліджень і розробок автономних та резервних систем живлення, адаптованих до сучасних екологічних умов.

Проект показав можливість створення сталого і ефективного джерела «зеленої» енергії, яке може працювати навіть в зимові умови нестачі сонячного світла.

Зимовий режим показав, що система залишалася працездатною навіть за низького сонячного випромінювання. Контролер ефективно компенсує слабку генерацію, а акумулятор згладжує різницю між денним виробництвом і вечірнім споживанням.

Взаємодія з мережею забезпечує гнучкий баланс управління: надлишок енергії направляється в загальну мережу, а в разі нестачі система автоматично переходить на зовнішнє джерело.

Список літератури:

1. Бех Я. П. Використання сонячної енергії для живлення залізничних стрілочних електроприладів [Текст] / Бех Я. П. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки», Том 36 (75) № 2, 2025 Частина 1, С. 200-204. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/29>
2. J. A. Aguado, A. J. Sanchez-Racero, S. de la Torre. Optimal Operation of Electric Railways with Renewable Energy and Electric Storage Systems // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – Vol. 9. – I. 2. – Pp. 993–1001. DOI: 10.1109/TSG.2016.2574200.
3. Бех Я. П. Аналіз резервних систем електроживлення пристроїв залізничної автоматики [Текст] / Системи та технології (правонаступник наукового журналу «Вісник Академії митної служби України». Серія: «Технічні науки»), № 2 (66), 2023, С. 66-73. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.8>.

4. Bekh Ya. Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Power System Under Fluctuating Irradiance Conditions, M. Serchenko, Y. Bekh and T. Serdiuk, 2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Chania, Crete, Greece, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169086

Bekh Ya.P. RESERVATION OF RAILWAY AUTOMATION DEVICES AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS FOR IMPLEMENTATION OF SOLAR ENERGY

Modeling of hybrid power with a solar power plant under variable conditions of solar radiation is carried out, emphasis is placed on the interaction between the photovoltaic system, batteries, inverter, controller and control algorithm.

Various weather conditions (sunny, cloudy, stormy, winter) were analyzed to assess the stability of the system.

The results confirm the system's ability to maintain stable DC voltage and uninterrupted power. Fixed near optimal power tracking. However, its sensitivity to noise and shading suggests the need for more adaptive approaches.

Winter simulations showed reduced current generation despite higher panel voltages, highlighting the importance of adaptive power and load management.

The use of alternative energy in railway transport has been studied, which also allows for energy conservation strategies and reduction of harmful carbon dioxide emissions.

The use of traction capacities of railways, which can make extensive use of new and renewable sources of non-traction energy, which can also be used in large volumes, is explored. Electric energy obtained from new and renewable energy sources can also be used in a wide spectrum.

The active development of solar energy in many countries is taken into account.

The modernization of the power supply system of railway automation is considered. It is suggested to use solar panels and grid inverter with or without battery. The modernization of the backup power supply system of railway automation and telecommunication devices was considered. An assessment of the electromagnetic compatibility of the renewable energy system was carried out.

In the railway power system, automation and telemechanics devices belong to the first category and are considered one of the main consumers. Therefore, they should be provided with a guaranteed power source.

The main goal of the work is to develop and demonstrate a modular, scalable solar generator system that increases energy sustainability and access to clean, distributed energy – especially for applications in regions like Ukraine where the reliability of energy infrastructure is critical.

Keywords: solar panels, inverter, solar energy, railway automation, simulation, modeling, backup power.

Дата першого надходження статті до видання: 18.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Захарчук О.П.<https://orcid.org/0000-0002-4359-5644>

Західноукраїнський національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ЧИСЕЛ МЕХАНІЧНОЇ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ ПАСАЖИРСЬКОГО АВТОБУСА З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ

У статті досліджено проблему підвищення паливної економічності пасажирських автобусів, що експлуатуються на міжміських та міжнародних маршрутах. У сучасних умовах значна частина автобусного парку автотранспортних підприємств України складається з транспортних засобів застарілих конструкцій, технічні параметри яких не повністю відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності та економічності експлуатації. Одним із ефективних способів підвищення паливної економічності таких транспортних засобів є оптимізація параметрів трансмісії, зокрема передавальних чисел механічної коробки передач (КПП).

Об'єктом дослідження є пасажирський автобус МАЗ-152062, оснащений дизельним двигуном ЯМЗ-7601 та восьмиступінчастою механічною КПП ЯМЗ-238М5. Встановлено, що наявна структура передавальних чисел не забезпечує ефективної роботи двигуна в зоні мінімальної питомої витрати палива під час руху з крейсерськими швидкостями на міжміських маршрутах, що призводить до підвищених витрат пального та зниження загальної енергоефективності транспортного засобу.

У роботі запропоновано модернізацію КПП шляхом заміни окремих пар шестерень і зміни передавальних чисел. На основі технічних характеристик автобуса проведено розрахунок тягово-швидкісних параметрів транспортного засобу, а також визначено силовий баланс і динамічний фактор для базового та модернізованого варіантів трансмісії, побудовано паливно-економічні характеристики та визначено розрахункові витрати палива залежно від швидкості руху транспортного засобу та режимів роботи двигуна. Результати досліджень показали, що оптимізація передавальних чисел трансмісії дозволяє знизити частоту обертання двигуна на сталих швидкостях руху та покращити умови його роботи у зоні найбільшої паливної ефективності. Розрахунки та експериментальні випробування підтвердили зменшення середньої витрати палива на міжміських маршрутах на 15–20 %. Отримані результати свідчать про доцільність модернізації трансмісії автобусів, що вже перебувають в експлуатації, без необхідності повної заміни силового агрегату або транспортного засобу в цілому.

Ключові слова: пасажирський автобус, механічна коробка передач, передавальні числа, трансмісія, паливна економічність, тягово-швидкісні характеристики, силовий баланс, енергоефективність.

Постановка проблеми. Сучасні умови експлуатації автобусів, задіяних у міжміських та міжнародних перевезеннях, суттєво відрізняються від тих, котрі працюють в умовах руху містом. Насамперед це велика протяжність рейсу, рух переважно з постійною швидкістю автомагістралями, переважно з повним навантаженням та зростаючими вимогами до паливної економічності й екологічної безпеки. Водночас значна частина автобусного парку автотранспортних підприємств України є фізично та морально застарілою, що ускладнює досягнення сучасних показників ефективності без суттєвих капіталовкладень у повну заміну рухомого складу. Об'єктом дослідження є пасажирський автобус МАЗ-152062, який експлуатується автотранспорт-

ним підприємством ПП "Терновояж" у міжміських перевезеннях. Це модель старого пострадянського зразка, комплектована потужним дизельним двигуном ЯМЗ-7601, котрий забезпечує дуже високий крутний момент і ресурс при роботі під великим навантаженням, отже призначений для важкої техніки, таким чином має високу витрату палива. Даний транспортний засіб оснащений механічною восьмиступеневою коробкою перемикачів швидкостей ЯМЗ-238М5, виконаної за схемою 4-ступенева КПП та демультіплікатор. Дана модель розрахована на передачу високого крутного моменту. Передавальні числа знаходяться в межах 1..9,48, підвищувальна передача відсутня, що спричиняє роботу двигуна на підвищених обертах при здійсненні транспортним

засобом міжміських перевезень. Це є додатковим фактором, котрий негативно впливає на паливну економічність пасажирського автобуса. Трансмісія, якою комплектуваний транспортний засіб, не забезпечує підтримку роботи двигуна в зоні оптимальних обертів у широкому діапазоні швидкостей. Це спричиняє підвищення паливних витрат, зростання теплових і механічних навантажень та зниження загальної енергоефективності транспортного засобу. При здійсненні міжміського рейсу середня витрата палива знаходиться в межах 32–40 л/100 км, що є доволі високим показником для автобуса такого пасажиро місткості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення паливної економічності та покращення тягово-швидкісних властивостей пасажирських автобусів залежить безпосередньо від обґрунтованого вибору структури трансмісії та оптимального підбору передавальних чисел її складових елементів. Особливої ваги це набуває для автобусів, що виконують міжміські та міжнародні рейси з великим місячним пробігом і тривалими режимами руху на сталих швидкостях. За таких умов навіть незначне відхилення режиму роботи двигуна від діапазону мінімальної питомої витрати палива спричиняє помітне зростання загальних витрат пального. Підвищення паливно-економічних властивостей транспортних засобів належить до ключових напрямів розвитку сучасної автомобільної галузі. Це зумовлено підвищенням цін на паливно-енергетичні ресурси, посиленням екологічних вимог до рухомого складу та необхідністю зниження експлуатаційних витрат автотранспортних підприємств. Найбільшої актуальності ця проблема набуває для пасажирських автобусів міжміського та міжнародного сполучення, оскільки вони експлуатуються за умов значних пробігів і тривалого руху зі сталою швидкістю.

У фундаментальних працях з теорії автомобіля та двигунів внутрішнього згоряння доведено, що рівень паливної економічності транспортного засобу суттєво залежить від режимів функціонування двигуна та раціональності використання його потужності [1, 2]. Зокрема, Дж. Б. Хейвуд зазначає, що мінімальна питома витрата палива дизельних двигунів досягається лише у обмеженому інтервалі частот обертання та навантажень, що потребує відповідного узгодження параметрів трансмісії з характеристиками двигуна [2].

Значна кількість сучасних наукових праць присвячена оптимізації роботи трансмісії, зокрема на обґрунтованому доборі передавальних чисел коробки передач і головної передачі. У роботах Л. Гуццалла та А. Скіарретта показано, що невідповідність передавальних чисел фактичним умо-

вам експлуатації спричиняти зростання витрати палива на 10–20 % у порівнянні з оптимальними режимами [1]. Автори наголошують, що для важких транспортних засобів, у тому числі автобусів, ефективним рішенням є застосування багатоступеневих трансмісій або раціонально оптимізованих механічних коробок передач.

У сучасних зарубіжних публікаціях значна увага приділяється Predictive Cruise Control (PCC) – системам прогнозного керування рухом, які враховують профіль дороги та умови руху. Новітні дослідження вдосконалюють цей підхід шляхом кооптимізації моменту двигуна та перемикання передач, що забезпечує додаткове зростання енергоефективності транспортного засобу [3].

Трансмісія є важливим елементом у забезпеченні паливної економічності транспортного засобу, так як визначає режими роботи двигуна за різних умов руху. Правильно підібрані передавальні числа трансмісії дають можливість понизити оберти двигуна в умовах швидкісної траси і зменшити втрати енергії та забезпечити мінімальну питому витрату пального [4, 5].

Постановка завдання. Отже актуальним питанням є пошук технічно обґрунтованих і економічно доцільних рішень щодо модернізації механічних коробок передач, які й надалі залишаються найпоширенішими на автотранспортних підприємствах. У зв'язку з цим, постає завдання оптимізації структури трансмісії пасажирських автобусів без заміни основних агрегатів, шляхом формалізованого та обґрунтованого добору передавальних чисел коробки передач. Розв'язання зазначеного завдання дасть можливість знизити витрати палива, покращити динамічні характеристики автобуса, підвищити ресурс силових агрегатів і забезпечити економічну ефективність експлуатації автобусів на міжнародних маршрутах. З метою зниження собівартості перевезень в умовах постійного зростання цін на паливо, автором поставлено завдання адаптувати коробку перемикання швидкостей до умов, у яких експлуатується досліджуваний транспортний засіб, а саме підвищити передавальні числа.

Виклад основного матеріалу. Власна маса транспортного засобу становить 12 800 кг, при цьому на задню вісь (візок) припадає 7 200 кг. Повна маса автомобіля дорівнює 18 000 кг, з яких на ведучу вісь припадає 11 500 кг. Такий розподіл маси має важливе значення під час визначення сили зчеплення ведучих коліс із дорожнім покриттям та при розрахунку тягових можливостей транспортного засобу.

Максимальна потужність двигуна становить 220 кВт, а максимальний крутний момент – 1300 Н·м. Максимальний крутний момент досягається

при частоті обертання колінчастого вала 1200 об/хв, тоді як максимальна потужність двигуна розвивається при 2100 об/хв. Ці параметри характеризують тягові можливості силового агрегату та визначають ефективність роботи двигуна в різних режимах експлуатації.

Трансмісія транспортного засобу обладнана восьмиступінчастою механічною коробкою передач, передаточні числа якої становлять: для першої передачі – 9,48, другої – 6,58, третьої – 4,68, четвертої – 3,48, п'ятої – 2,48, шостої – 1,81, сьомої – 1,35, восьмої – 1,00. Крім того, у трансмісії використовується додаткова коробка передач із передаточним числом 3,67 на вищій передачі та головна передача з передаточним числом 4,44. Сукупність цих передаточних чисел визначає зміну крутного моменту та швидкості руху автомобіля на різних передачах.

Для підвищення передавального числа трансмісії проведено заміну трьох пар шестерень, як зображено на рис. 1.

Передавальне число уніфікованої КПП розраховуємо як відношення числа зубців веденої шестерні ($Z_{\text{ведена}}$) до ведучої ($Z_{\text{ведуча}}$).

$$u_{ki} = \frac{Z_{\text{ведена}}}{Z_{\text{ведуча}}}, \quad (1)$$

Отримано значення передаточного числа трансмісії для кожної передачі із відомої залежності [6]:

$$U_j = u_{ki} \cdot u_0, \quad (2)$$

Дані розрахунків зведемо в табл. 2.

Виконано дослідження силових та динамічних показників транспортного засобу у робочому діапазоні частот обертання двигуна. Розраховано поточне значення потужності двигуна, у відповідності до частоти обертання колінчастого вала двигуна (n , об/хв).

$$N_e = N_{\text{max}} \left[A_1 \cdot \frac{n}{n_N} + A_2 \cdot \left(\frac{n}{n_N} \right)^2 - A_3 \cdot \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$M_e = 9550 \frac{N_e}{n}, H \cdot m. \quad (4)$$

де N_e – ефективна потужність двигуна при частоті обертання n , кВт;

N_{max} – максимальна ефективна потужність двигуна, кВт;

Таблиця 2

Передавальні відношення трансмісії транспортного засобу

Передача	I	I	II	IV	V	VI	VII	VIII
u_{ki} , після уніфікації	6,24	5,32	3,67	2,94	1,7	1,45	1	0,8
U_j , стандартна	73,79	53,84	39,05	31,02	20,07	14,68	10,65	8,45
U_j , модернізована	65,88	48,07	34,87	27,70	17,92	13,11	9,51	7,55

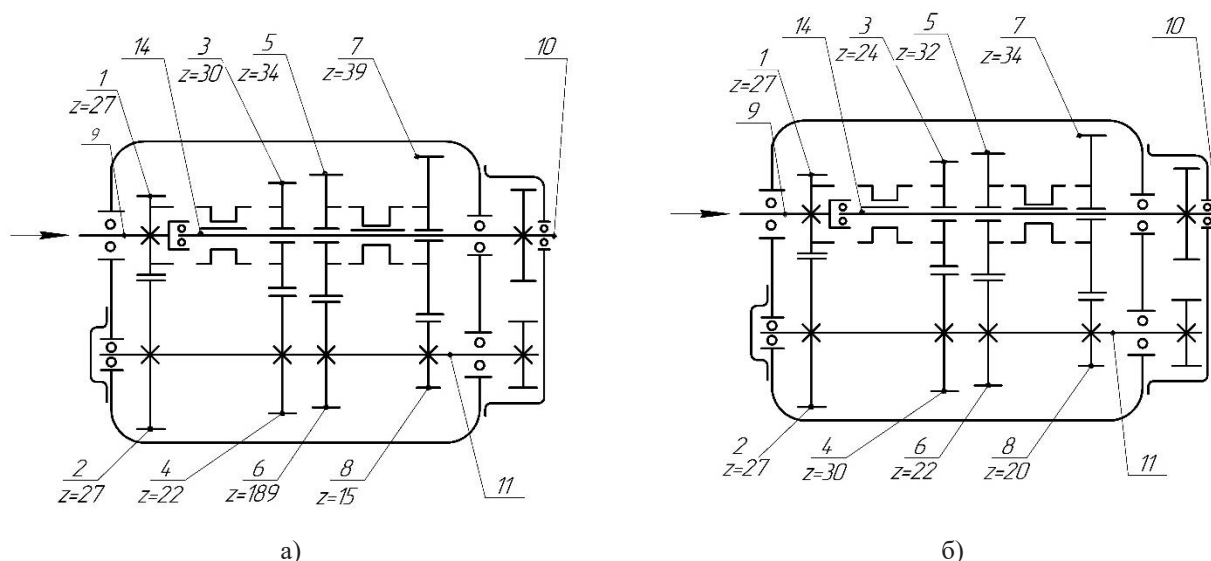


Рис. 1. Кінематична схема стандартної коробки передач ЯМЗ-238М5

а) до заміни шестерень; б) після заміни шестерень 1,2 – шестерні четвертої та восьмої передачі; 3,4 – шестерні третьої та сьомої передачі; 5,6 – шестерні другої та шостої передачі; 7, 8 – шестерні першої та п'ятої передачі; 9 – первинний вал; 10 – вторинний вал; 11 – проміжний вал

n – поточна частота обертання колінчастого вала двигуна, об/хв;

n_N – номінальна частота обертання колінчастого вала двигуна, об/хв;

A_1, A_2, A_3 – емпіричні коефіцієнти, що характеризують форму зовнішньої швидкісної характеристики двигуна.

Для дизельних двигунів значення емпіричних коефіцієнтів становлять $A_1 = 0,5, A_2 = 1,5, A_3 = 1$.

Розрахуємо тягове зусилля на ведучих колесах:

$$P_{ki} = \frac{M_e \cdot u_{ki} \cdot u_0 \cdot \eta}{r_0} \quad (5)$$

Для того, щоб розрахувати динамічну характеристику автобуса для кожної i -ї передачі розрахуємо швидкість V , км/год із залежності:

$$V_i = 0,377 \cdot \frac{n \cdot r}{u_{kl} \cdot u_0} \quad (6)$$

Розрахуємо силу опору повітря P_w , Н:

$$P_w = \frac{k \cdot F \cdot V^2}{3,6^2} \quad (7)$$

де F – лобова площа автомобіля, м²;

V – швидкість автомобіля, км/год;

k – коефіцієнт опору повітрю

Щоб оцінити здатність автомобіля розганятися, підтримувати рух із заданою швидкістю та долати підйоми дороги розраховано його динамічний фактор:

$$D = \frac{P_k - P_w}{m_a \cdot g} \quad (7)$$

Результати розрахунку для транспортного засобу у базовій комплектації внесли до табл. 3, а модернізованого до табл. 4.

Таблиця 3

Силовий баланс автобуса в базовій комплектації

Параметри		Значення параметрів						
п, об/хв		600	800	1000	1200	1400	1600	1800
N _e , кВт		50,01	71,45	94,44	116,71	136,99	153,84	165,90
M _e , Н·м		782,71	853,38	902,30	929,47	934,91	918,60	880,55
1 передача	V, км/год	3,505	4,673	5,842	7,01	8,178	9,347	10,515
	P _к , Н	102100	111300	117700	121200	121900	119800	114800
	P _w , Н	3,907	6,945	10,852	15,627	21,27	27,781	35,16
	D	0,579	0,631	0,667	0,687	0,691	0,679	0,651
2 передача	V, км/год	4,691	6,254	7,818	9,381	10,945	12,508	14,072
	P _к , Н	76280	83170	87940	90590	91120	89530	85820
	P _w , Н	6,996	12,438	19,434	27,986	38,091	49,752	62,967
	D	0,432	0,471	0,498	0,513	0,516	0,507	0,486
3 передача	V, км/год	6,63	8,839	11,049	13,259	15,469	17,679	19,889
	P _к , Н	53970	58840	62220	64090	64470	63340	60720
	P _w , Н	13,977	24,847	38,824	55,907	76,095	99,389	125,79
	D	0,306	0,333	0,352	0,363	0,365	0,359	0,343
4 передача	V, км/год	8,345	11,126	13,908	16,689	19,471	22,253	25,034
	P _к , Н	42880	46750	49430	50920	51220	50320	48240
	P _w , Н	22,144	39,367	61,51	88,575	120,56	157,467	199,294
	D	0,243	0,265	0,28	0,288	0,29	0,284	0,272
5 передача	V, км/год	12,061	16,082	20,102	24,123	28,143	32,164	36,184
	P _к , Н	29670	32340	34200	35230	35430	34820	33370
	P _w , Н	46,261	82,242	128,503	185,045	251,866	328,968	416,351
	D	0,168	0,183	0,193	0,199	0,199	0,196	0,187
6 передача	V, км/год	16,127	21,503	26,878	32,254	37,629	43,005	48,381
	P _к , Н	22190	24190	25580	26350	26500	26040	24960
	P _w , Н	82,704	147,03	229,734	330,818	450,279	588,12	744,339
	D	0,125	0,136	0,144	0,147	0,148	0,144	0,137
7 передача	V, км/год	22,782	30,376	37,97	45,563	53,157	60,751	68,345
	P _к , Н	15710	17120	18110	18650	18760	18430	17670
	P _w , Н	165,04	293,41	458,45	660,17	898,57	1174	1485
	D	0,088	0,095	0,1	0,102	0,101	0,098	0,092
8 передача	V, км/год	28,707	38,276	47,845	57,414	66,983	76,552	86,121
	P _к , Н	12460	13590	14370	14800	14890	14630	14020
	P _w , Н	262,06	465,8	727,95	1048	1427	1864	2359
	D	0,069	0,074	0,077	0,078	0,076	0,072	0,066

Силовий баланс модернізованого автобуса

Параметри		Значення параметрів						
n, об/хв		600	800	1000	1200	1400	1600	1800
N _с , кВт		50,01	71,45	94,44	116,71	136,99	153,84	165,90
M _с , Н·м		782,71	853,38	902,30	929,47	934,91	918,60	880,55
1 передача	V, км/год	4,416	5,888	7,361	8,833	10,305	11,777	13,249
	P _к , Н	81020	88340	93400	96210	96770	95090	91150
	P _w , Н	6,202	11,026	17,229	24,809	33,768	44,105	55,821
	D	0,459	0,501	0,529	0,545	0,548	0,539	0,516
2 передача	V, км/год	6,379	8,505	10,632	12,758	14,884	17,011	19,137
	P _к , Н	56094	61169	64663	66615	67279	65836	63174
	P _w , Н	12,94	23,005	35,945	51,761	70,452	92,019	116,462
	D	0,318	0,347	0,366	0,377	0,379	0,373	0,357
3 передача	V, км/год	8,345	11,126	13,908	16,689	19,471	22,253	25,034
	P _к , Н	42884	46751	49431	50928	51224	50323	48245
	P _w , Н	22,144	39,367	61,51	88,575	120,56	157,467	199,294
	D	0,243	0,265	0,28	0,288	0,29	0,284	0,272
4 передача	V, км/год	10,179	13,572	16,965	20,359	23,752	27,145	30,538
	P _к , Н	35158	38322	40522	41743	41997	41251	39556
	P _w , Н	32,951	58,579	91,529	131,802	179,398	234,315	296,555
	D	0,199	0,217	0,229	0,236	0,237	0,233	0,222
5 передача	V, км/год	15,433	20,577	25,722	30,866	36,01	41,155	46,299
	P _к , Н	23190	25285	26733	27530	27693	27214	26085
	P _w , Н	75,74	134,649	210,39	302,961	412,364	538,598	681,663
	D	0,131	0,143	0,15	0,154	0,155	0,151	0,144
6 передача	V, км/год	21,913	29,217	36,522	43,826	51,13	58,435	65,739
	P _к , Н	16333	17848	18825	19392	19548	19167	18377
	P _w , Н	152,66	271,4	424,15	610,78	831,34	1086	1374
	D	0,092	0,099	0,104	0,106	0,106	0,102	0,096
7 передача	V, км/год	28,707	38,276	47,845	57,414	66,983	76,552	86,121
	P _к , Н	12466	13592	14377	14837	14896	14635	14022
	P _w , Н	262,06	465,89	727,95	1048	1427	1864	2359
	D	0,069	0,074	0,077	0,078	0,076	0,072	0,066
8 передача	V, км/год	35,007	46,676	58,345	70,014	81,682	93,351	105,02
	P _к , Н	10222	11146	11785	12142	12218	12747	11553
	P _w , Н	389,7	692,8	1083	1559	2122	2771	3507
	D	0,056	0,059	0,061	0,06	0,057	0,052	0,045

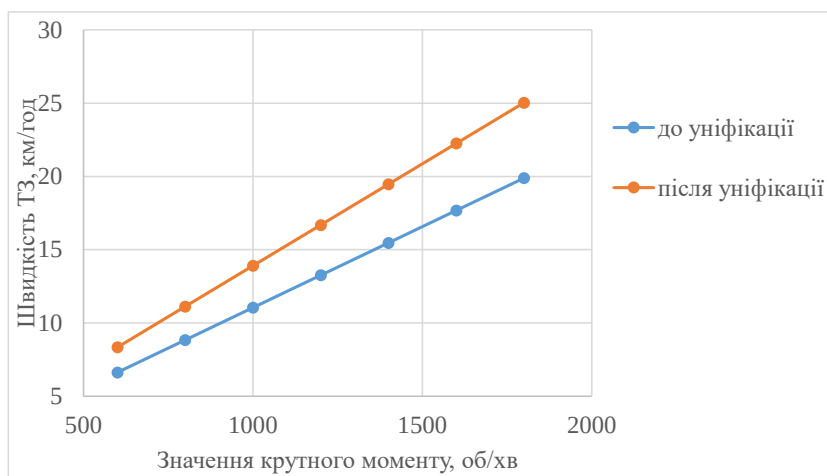


Рис. 2. Залежність швидкості транспортного засобу від частоти обертання колінчастого вала двигуна на третій передачі

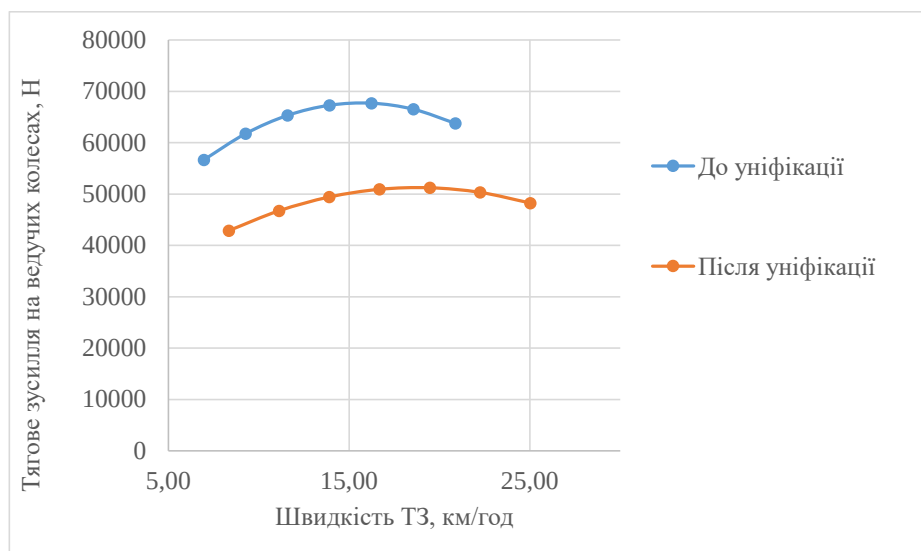


Рис. 3. Тягова характеристика транспортного засобу до та після уніфікації трансмісії на третій передачі

Для прогнозування витрати палива проведемо розрахунок паливно-економічної характеристики пасажирського автобуса для базового варіанта та після уніфікації. Питома витрата палива визначається за відповідною залежністю:

$$g_e(n_i) = g_N \cdot k_n(n_i), \quad (9)$$

де g_N – питома витрата палива при номінальному режимі роботи двигуна, г/(кВт год) для дизельного двигуна $g_N = 240$ г/(кВт год);

$g_e(n_i)$ – питома ефективна витрата палива при частоті обертання n_i , г/(кВт·год);

$k_n(n_i)$ – коефіцієнт, що враховує зміну питомої витрати палива залежно від частоти обертання двигуна.

$$k_n(n_i) = 1.25 - 0.99 \cdot \left(\frac{n_i}{n_N}\right)^2 - 0.24 \left(\frac{n_i}{n_N}\right)^3 \quad (10)$$

Паливну економічність транспортного засобу для кожної передачі (9) було визначено на основі його паливно-швидкісної характеристики. Для

того, щоб виконати побудову цієї характеристики застосовують відповідну залежність:

$$Q(n_i, U_j) = \frac{g_n \cdot (k_n(n_i)) \cdot k_N(n_i, U_j)}{3.610 \cdot \eta_{mp} \cdot \rho_n \cdot 1000} \cdot (F_\psi \cdot F_\omega(n_i, U_j)) \quad (11)$$

ρ_n – густина пального, кг/л;

Для подальших розрахунків визначено силу опору дороги руху автомобіля, Н:

$$P_\psi = \psi \cdot G \quad (12)$$

де $G = g \cdot G_a$ – повна вага автомобіля, Н;

$g = 9,8$ м/с² – прискорення вільного падіння;

m – маса автомобіля;

При цьому залежність, яка використовується для визначення коефіцієнта $k_n(n_i, U_j)$, який характеризує ступінь використання потужності двигуна під час руху транспортного засобу має наступний вигляд:

$$k_n(n_i, U_j) = 3.27 - 8.22 \cdot \frac{F_\psi + F_\omega(n_i, U_j)}{F_k(n_i, U_j)} + 9.13 \cdot \left(\frac{F_\psi + F_\omega(n_i, U_j)}{F_k(n_i, U_j)}\right)^2 - 3.18 \cdot \left(\frac{F_\psi + F_\omega(n_i, U_j)}{F_k(n_i, U_j)}\right)^3 \quad (13)$$

Отримані значення занесемо у таблицю.

Таблиця 5

Розрахункові витрати пального до уніфікації

Параметри	Значення параметрів						
n , об/хв	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
M_e , Н·м	50,01	71,45	94,44	116,71	136,99	153,84	165,9
Q_1 , л/100км	40,3	39,8	39,8	40,1	40,8	41,6	42,2
Q_2 , л/100км	39,6	39,1	39,0	39,3	40,0	40,9	41,4
Q_3 , л/100км	38,8	38,3	38,2	38,5	39,2	40,0	40,9
Q_4 , л/100км	38,0	37,5	37,4	37,7	38,4	39,2	39,7
Q_5 , л/100км	37,1	36,7	36,6	36,9	37,5	38,4	38,8
Q_6 , л/100км	35,9	35,5	35,4	35,7	36,3	37,1	37,6
Q_7 , л/100км	34,9	34,5	34,4	34,7	35,3	36,1	36,6
Q_8 , л/100км	34,1	33,8	33,7	34,0	34,6	35,3	35,8

Розрахункові витрати пального після уніфікації

Параметри	Значення параметрів						
n, об/хв	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
M_e , Н·м	50,01	71,45	94,44	116,71	136,99	153,84	165,9
Q_1 , л/100км	32,27	31,86	31,81	32,08	32,60	33,32	33,74
Q_2 , л/100км	31,66	31,25	31,21	31,47	31,98	32,68	33,10
Q_3 , л/100км	31,01	30,62	30,57	30,83	31,33	32,02	32,74
Q_4 , л/100км	30,36	29,98	29,93	30,19	30,68	31,35	31,75
Q_5 , л/100км	29,72	29,34	29,30	29,54	30,03	30,69	31,07
Q_6 , л/100км	28,75	28,39	28,34	28,58	29,05	29,69	30,06
Q_7 , л/100км	27,92	27,60	27,52	27,76	28,24	28,88	29,28
Q_8 , л/100км	27,28	27,04	26,96	27,20	27,68	28,24	28,64

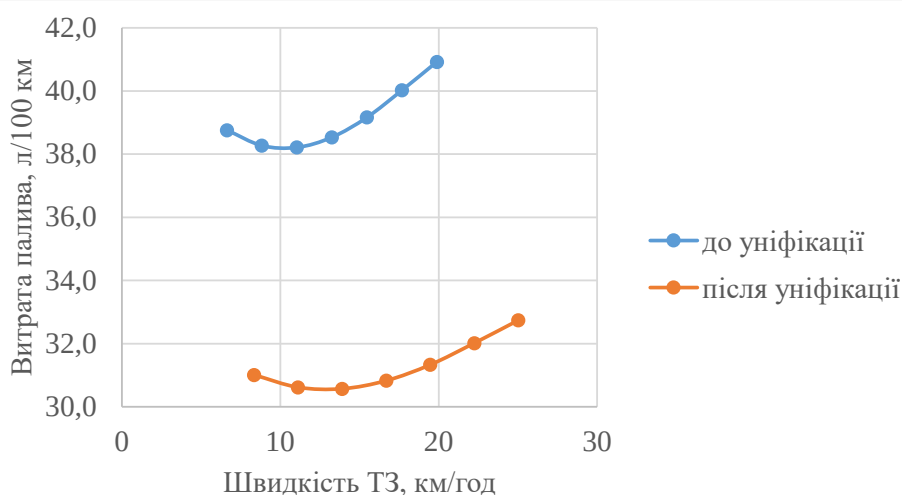


Рис. 4. Розрахункова витрата палива транспортного засобу до та після уніфікації трансмісії на третій передачі

На практиці дана уніфікація проведена на базі автотранспортного підприємства ПП "Терновояж", а розхід палива перевірений на кількох маршрутах. На маршруті Львів – Щецин середня витрата палива становила 33,2 л/100 км до заміни шестерень КПП, та 26,4 після заміни, на маршруті Запоріжжя – Слупськ 35,1 л/100 км та 27,7 л/100 км відповідно, на туристичному маршруті Тернопіль – Яремче 38,5 л/100 км та 35,5 відповідно.

Висновки. У результаті виконаного дослідження проаналізовано вплив передавальних чисел механічної коробки передач на тягово-швидкісні та паливно-економічні показники пасажирського автобуса МАЗ-152062. Встановлено, що наявна структура трансмісії не забезпечує ефективної роботи двигуна у зоні мінімальної питомої витрати палива під час руху з крейсерськими швидкостями на міжміських маршрутах, що призводить до підвищених обертів двигуна та збільшення витрат пального.

Запропоновано модернізацію трансмісії шляхом зміни передавальних чисел механічної коробки передач через заміну окремих пар шестерень. На основі технічних характеристик транспортного засобу виконано розрахунок передавальних відношень трансмісії, силового балансу, швидкісних характеристик та динамічного фактору автобуса до і після модернізації. Проведені розрахунки показали, що оптимізація передавальних чисел дозволяє знизити частоту обертання колінчастого валу двигуна під час руху на вищих передачах, що сприяє покращенню умов його роботи та підвищенню енергоефективності транспортного засобу.

Розрахунок паливно-економічних характеристик показав суттєве зменшення витрати палива після уніфікації трансмісії. Зокрема, розрахункові значення витрати палива зменшилися з приблизно 34-40 л/100 км до 27-32 л/100 км залежно від режиму руху. Практичні випробування на реальних маршрутах також підтвердили ефективність

запропонованої модернізації: середня витрата палива зменшилась приблизно на 15-20 %.

Таким чином, оптимізація передавальних чисел механічної коробки передач є ефективним і технічно доцільним способом підвищення паливної економічності автобусів, що експлуатуються на міжміських маршрутах. Запропоноване рішення не потребує повної заміни силового

агрегату або транспортного засобу, що робить його економічно вигідним для автотранспортних підприємств і дозволяє знизити експлуатаційні витрати при збереженні необхідних тягових властивостей транспортного засобу. Разом з тим доцільно дослідити залишковий ресурс вузлів досліджуваного транспортного засобу, які підлягають такій уніфікації.

Список літератури:

1. Guzzella L., Sciarretta A. *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. 2nd ed. Berlin : Springer. 2013. 422 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>
2. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education. 2018. 1072 p. <https://doi.org/10.1036/9781260116116>
3. Chu H., Na X., Liu H., Wang Y., Yang Z., Zhang L. Real-Time Co-optimization of Gear Shifting and Engine Torque for Predictive Cruise Control of Heavy-Duty Trucks. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 37. Article 42. <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01015-7>
4. Milićević S. V., Blagojević I. A. Optimization of gear ratios and gear-shifting strategy for enhanced efficiency in tracked vehicles. *Military Technical Courier*. 2023. Vol. 71, No. 4. Pp. 1028–1045. https://www.academia.edu/122577446/Optimization_of_gear_ratios_and_gear_shifting_strategy_for_enhanced_efficiency_in_tracked_vehicles
5. Пельо Р. М. Оптимізація параметрів трансмісії транспортних засобів : дис. канд. техн. наук : 05.22.02 / Р. М. Пельо. – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2020. – 200 с. – URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1754/dysertaciyaapeloroman.pdf>
6. Тяговий розрахунок автомобіля. Методичні вказівки для курсового проекту з дисципліни «Автомобілі» для підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 274 – «Автомобільний транспорт» / Укл.: Литвин О.О., Кушельний Я.В., Скляр В.М.–Чернівці: ЧНТУ, 2019. – 48с. <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/a696d1e5-05c7-4df5-bb1e-77e5a573f8ff/content>

Zakharchuk O.P. OPTIMIZATION OF GEAR RATIOS OF A PASSENGER BUS MANUAL TRANSMISSION TO IMPROVE FUEL ECONOMY

The article investigates the problem of increasing the fuel efficiency of passenger buses operated on intercity and international routes. In modern conditions, a significant part of the bus fleet of Ukrainian motor transport enterprises consists of vehicles of outdated designs, the technical parameters of which do not fully meet modern requirements for energy efficiency and operating economy. One of the effective ways to increase the fuel efficiency of such vehicles is to optimize the transmission parameters, in particular the gear ratios of the manual transmission (GPT).

The object of the study is the MAZ-152062 passenger bus, equipped with a YaMZ-7601 diesel engine and an eight-speed YaMZ-238M5 manual gearbox. It was found that the existing gear ratio structure does not ensure efficient engine operation in the zone of minimum specific fuel consumption when driving at cruising speeds on intercity routes, which leads to increased fuel consumption, increased thermal and mechanical loads on units and a decrease in the overall energy efficiency of the vehicle.

The paper proposes a gearbox modernization by replacing individual pairs of gears and changing the gear ratios. Based on the technical characteristics of the bus, the vehicle's traction and speed parameters were calculated, and the power balance and dynamic factor were determined for the basic and modernized transmission variants., fuel-economic characteristics were constructed, and the estimated fuel consumption was determined depending on the vehicle's speed and engine operating modes. The research results showed that optimizing the transmission gear ratios allows reducing the engine's rotation frequency at constant speeds and improving its operating conditions in the zone of greatest fuel efficiency. Calculations and experimental tests confirmed a 15–20% reduction in average fuel consumption on intercity routes. The results obtained indicate the feasibility of upgrading the transmission of buses already in operation without the need for a complete replacement of the power unit or the vehicle as a whole.

Keywords: *passenger bus, manual gearbox, gear ratios, transmission, fuel efficiency, traction-speed characteristics, power balance, energy efficiency.*

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Коломицев В.М.<https://orcid.org/0009-0004-1187-6259>

Національна академія Національної гвардії України

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСМІСІЙ ПОВНОПРИВІДНИХ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

Стаття присвячена аналізу сучасних конструкцій трансмісій повнопривідних вантажних автомобілів та оцінці їх впливу на основні експлуатаційні показники машин підвищеної прохідності. Розглянуто призначення і загальну будову трансмісії вантажного автомобіля, визначено її роль у забезпеченні прохідності, керованості, паливної економічності та надійності в складних дорожніх і кліматичних умовах експлуатації. Узагальнено основні вимоги до трансмісій повнопривідних автомобілів, зокрема щодо міцності, ефективності розподілу крутного моменту, високого коефіцієнта корисної дії, універсальності та автоматизації керування.

Проведено порівняльний аналіз механічних, автоматизованих та гідромеханічних трансмісій, визначено їх переваги та обмеження при використанні у важких умовах експлуатації. Встановлено, що механічні трансмісії залишаються найбільш поширеними завдяки простоті конструкції та високому ККД, тоді як автоматизовані й гідромеханічні системи забезпечують підвищену плавність роботи, але характеризуються більшою складністю та залежністю від електронних систем керування.

Окрему увагу приділено аналізу систем повного приводу з постійним підключенням ведучих мостів, примусовим підключенням та застосуванням міжосьових диференціалів. Систематизовано їх основні недоліки, зокрема підвищені втрати потужності, ударні навантаження та складність конструкції. Доведено, що існуючі рішення не завжди забезпечують оптимальне поєднання прохідності, економічності та керованості, що обґрунтовує необхідність подальшого удосконалення трансмісій повнопривідних вантажних автомобілів. Для повнопривідних вантажних автомобілів конструкція трансмісії ускладнюється необхідністю узгодження роботи кількох ведучих мостів. Неправильний розподіл крутного моменту або жорстке з'єднання мостів у невідповідних умовах руху може призводити до виникнення циркуляції потужності, підвищеного зносу деталей та погіршення керованості автомобіля.

Отримані результати формують науково обґрунтовану базу для вибору перспективного напрямку модернізації трансмісії із застосуванням керованого повного приводу та гнучкого розподілу крутного моменту між ведучими мостами.

Ключові слова: повнопривідний вантажний автомобіль, трансмісія, система повного приводу, механічна трансмісія, автоматизована трансмісія, розподіл крутного моменту, прохідність, експлуатаційні показники.

Постановка проблеми. Автомобільний транспорт відіграє важливу роль у забезпеченні економічних, виробничих та оборонних потреб держави. Особливе місце серед транспортних засобів займають вантажні автомобілі підвищеної прохідності, які експлуатуються у складних дорожніх, кліматичних та експлуатаційних умовах. Ефективність роботи таких автомобілів значною мірою залежить від конструкції їх трансмісії, оскільки саме вона забезпечує передачу крутного моменту від двигуна до ведучих коліс та визначає тягові, динамічні й експлуатаційні характеристики транспортного засобу.

У сучасних умовах експлуатації вантажних автомобілів все частіше виникає потреба поєднання

високої прохідності з належною керованістю, курсовою стійкістю та паливною економічністю. Традиційні схеми повного приводу, які передбачають постійне підключення всіх ведучих мостів, забезпечують високу прохідність, однак супроводжуються підвищеними втратами енергії в трансмісії, збільшенням витрати пального, зростанням зносу агрегатів та погіршенням керованості під час руху по дорогах з твердим покриттям. У свою чергу, вантажні автомобілі з заднім приводом, хоча і є більш економічними, не завжди здатні забезпечити необхідну прохідність у складних дорожніх умовах.

Одним із перспективних напрямів удосконалення трансмісій вантажних автомобілів є засто-

сування схем з постійним приводом на передній ведучий міст та можливістю автоматичного або примусового підключення заднього ведучого моста. Такий підхід дозволяє поєднати переваги переднього приводу, а саме покращену керованість і курсову стійкість, з можливістю реалізації повного приводу у разі погіршення умов руху. Реалізація подібних схем потребує застосування спеціальних пристроїв розподілу крутного моменту, серед яких перспективним рішенням є використання багатодискових фрикційних муфт з керованим режимом роботи.

В умовах сучасних бойових дій виникає необхідність підвищення експлуатаційних властивостей повнопривідних вантажних автомобілів шляхом удосконалення конструкції їх трансмісії. Особливо важливим є створення таких конструктивних рішень, які забезпечують автоматичну адаптацію трансмісії до умов руху без втручання водія, зменшення втрат потужності, підвищення надійності агрегатів та покращення загальних показників ефективності автомобіля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання вдосконалення конструкцій та підвищення експлуатаційних властивостей вантажних автомобілів підвищеної прохідності є об'єктом активних наукових дискусій. Зокрема, у роботі Коробко А.І та Семенова І.В. [1] проведено системний аналіз сучасних тенденцій розвитку трансмісій, де доведено, що ефективність повнопривідних машин безпосередньо залежить від здатності системи адаптуватися до змінних дорожніх умов шляхом раціонального розподілу потужності між ведучими колесами. Автори зазначають, що автоматизація керування трансмісією є ключовим фактором підвищення надійності в екстремальних режимах експлуатації.

Дослідження Коломицева В. М. [2] присвячені еволюції будови вантажних автомобілів від класичних схем до сучасних високотехнологічних зразків. Автор обґрунтовує, що для військових вантажівок критично важливою є інтеграція електронних систем керування та використання інноваційних матеріалів, що дозволяє підвищити загальну ефективність та живучість шасі в умовах сучасного театру воєнних дій.

Питання розвитку важких колісних тактичних автомобілів (ВТА) детально висвітлено у праці Кохана В. Ф. [3]. Автор формулює базові вимоги до перспективного парку техніки ЗС України, спираючись на досвід країн НАТО, та вказує, що перехід на нове покоління ВТА потребує впровадження незалежних підвісок та нових схем при-

водів для забезпечення необхідного рівня мобільності та захисту.

Окремий пласт досліджень стосується впровадження комбінованих (гібридних) енергетичних установок. У дослідженнях Крайника Л. [4] запропоновано методичні засади визначення параметрів гібридного приводу, що базуються на аналізі тягово-динамічних характеристик при русі в умовах повного бездоріжжя. Розвиваючи цю тематику, Кіхтан А. у статті [5] доводить, що використання гібридних схем дозволяє не лише покращити паливну економічність, а й забезпечити специфічні військові потреби, такі як мінімізація звукової та інфрачервоної локації під час переміщення.

Незважаючи на значний обсяг проведених досліджень, залишається актуальним питання розробки конкретних технічних рішень для оптимізації роботи трансмісій з керованим підключенням мостів. Зокрема, потребує додаткового вивчення ефективність використання багатодискових фрикційних муфт для усунення явищ циркуляції потужності в трансмісіях вантажних автомобілів, що і розглядається у даній статті.

Постановка завдання. Метою статті є підвищення прохідності, керованості та ефективності роботи вантажного автомобіля шляхом конструктивного удосконалення трансмісії з постійним приводом на передній ведучий міст і керованим підключенням заднього моста.

Виклад основного матеріалу. Трансмісія є однією з основних систем вантажного автомобіля, яка забезпечує передачу крутного моменту від двигуна до ведучих коліс, а також зміну його величини та напрямку залежно від режимів руху і умов експлуатації [1]. Від конструктивних особливостей трансмісії значною мірою залежать тягово-динамічні властивості автомобіля, його прохідність, керованість, паливна економічність та надійність у процесі експлуатації [2].

Для вантажних автомобілів, які експлуатуються у складних дорожніх умовах, трансмісія повинна забезпечувати можливість ефективної реалізації потужності двигуна як на дорогах з твердим покриттям, так і на ґрунтових, слизьких або деформованих поверхнях [4]. У таких умовах особливого значення набуває правильний розподіл крутного моменту між ведучими мостами, а також здатність трансмісії адаптуватися до змін навантаження без зниження керованості та стійкості автомобіля [1].

Загалом трансмісія вантажного автомобіля виконує такі основні функції:

- передає крутний момент від двигуна до ведучих коліс;
- змінює величину крутного моменту та частоту обертання залежно від умов руху;
- забезпечує можливість рушання з місця, руху заднім ходом і тривалої роботи двигуна на холостому ходу;
- здійснює розподіл крутного моменту між ведучими мостами у повнопривідних автомобілях [1].

У типовому виконанні трансмісія вантажного автомобіля складається з таких основних елементів: зчеплення, коробки передач, карданної передачі, головної передачі, диференціалів та півосей [2]. У повнопривідних автомобілях до складу трансмісії додатково входить роздавальна коробка, яка забезпечує підключення одного або кількох ведучих мостів і розподіл крутного моменту між ними.

Крутний момент від двигуна через зчеплення передається на коробку передач, де здійснюється зміна передаточних чисел відповідно до режиму руху автомобіля.

Далі крутний момент надходить до роздавальної коробки, яка забезпечує його розподіл між переднім і заднім ведучими мостами. Через карданні передачі крутний момент передається до переднього та заднього ведучих мостів. У ведучих мостах крутний момент проходить через головні передачі та диференціали і передається на ведучі колеса, забезпечуючи рух вантажного автомобіля [2].

Важливою особливістю трансмісій вантажних автомобілів є робота в умовах значних навантажень і крутних моментів, що зумовлює підвищені вимоги до міцності, жорсткості та довговічності її елементів [3]. Крім того, трансмісія повинна забезпечувати стабільну роботу за тривалих навантажень, характерних для руху з повним завантаженням, а також у режимах частих зупинок і рушань.

Для повнопривідних вантажних автомобілів конструкція трансмісії ускладнюється необхідністю узгодження роботи кількох ведучих мостів. Неправильний розподіл крутного моменту або жорстке з'єднання мостів у невідповідних умовах руху може призводити до виникнення циркуляції потужності, підвищеного зносу деталей та погіршення керованості автомобіля [1]. Саме тому сучасні трансмісії все частіше оснащуються керованими елементами, які дозволяють автоматично змінювати режим роботи залежно від умов експлуатації [2].

Трансмісія в системі вантажного автомобіля виконує комплекс взаємопов'язаних функцій, які забезпечують можливість ефективного викорис-

тання потужності двигуна в різних умовах руху. На відміну від двигуна, який працює в обмеженому діапазоні частот обертання та крутних моментів, трансмісія дозволяє адаптувати ці параметри до вимог дорожніх і експлуатаційних умов [5].

Таблиця 1

Основні елементи трансмісії вантажного автомобіля та їх призначення

Елемент трансмісії	Основне призначення
Зчеплення	Короткочасне роз'єднання двигуна з трансмісією
Коробка передач	Зміна передаточного числа та режимів руху
Карданна передача	Передача моменту між агрегатами
Роздавальна коробка	Розподіл крутного моменту між мостами
Диференціал	Забезпечення різних швидкостей обертання коліс

Основною функцією трансмісії є передача крутного моменту від двигуна до ведучих коліс автомобіля. При цьому передача моменту здійснюється через ряд механічних агрегатів, кожен з яких виконує свою окрему задачу, але всі вони працюють як єдина система. Надійність і ефективність цієї передачі безпосередньо впливають на тягові можливості автомобіля та його здатність рухатися з навантаженням [4].

Для повнопривідних вантажних автомобілів додатковою і надзвичайно важливою функцією трансмісії є розподіл крутного моменту між ведучими мостами. Правильний розподіл моменту дозволяє підвищити прохідність автомобіля, зменшити пробуксовування коліс та покращити курсову стійкість [1].

Трансмісія повнопривідного вантажного автомобіля працює в умовах значно складніших, ніж трансмісія легкового або автомобіля з заднім приводом. Це зумовлено великими масами транспортних засобів, високими крутними моментами двигунів, змінними дорожніми умовами та необхідністю забезпечення надійної роботи при тривалих навантаженнях [3]. У зв'язку з цим до трансмісій повнопривідних вантажних автомобілів висувається ряд специфічних вимог, які необхідно враховувати на етапі проектування та удосконалення їх конструкції [4].

Однією з основних вимог є висока міцність і надійність елементів трансмісії. Деталі трансмісії повинні витримувати значні крутні моменти, а також короткочасні пікові навантаження, що виникають під час рушання з місця, руху по бездоріжжю або подолання підйомів. Недостатня міцність окремих елементів може призводити до

передчасного виходу з ладу агрегатів і зниження загальної надійності автомобіля.

Важливою вимогою є забезпечення ефективного розподілу крутного моменту між ведучими мостами. У повнопривідних автомобілях неправильний або жорстко фіксований розподіл моменту може викликати пробуксовування коліс, підвищений знос шин і деталей трансмісії, а також погіршення керування. Тому сучасні трансмісії повинні забезпечувати можливість адаптації розподілу крутного моменту залежно від умов руху [5].

У процесі розвитку автомобільної техніки було створено кілька основних типів трансмісій, які відрізняються принципом передачі та перетворення крутного моменту, рівнем автоматизації, складністю конструкції та експлуатаційними характеристиками. Для вантажних автомобілів вибір типу трансмісії має особливе значення, оскільки вони працюють у режимах значних навантажень, тривалого руху та часто в складних дорожніх умовах.

Найбільш поширеними у вантажному автомобілебудуванні є механічні, автоматизовані та гідромеханічні трансмісії. Кожен із цих типів має свої переваги та недоліки, які проявляються залежно від умов експлуатації, призначення автомобіля та вимог до його тягових і динамічних властивостей [1]. При цьому для повнопривідних вантажних автомобілів до трансмісії додатково висуваються вимоги щодо ефективного розподілу крутного моменту між ведучими мостами та забезпечення стійкої роботи в умовах змінного зчеплення коліс з дорогою.

Механічні трансмісії характеризуються простотою конструкції, високим коефіцієнтом корисної дії та надійністю, що робить їх доцільними для використання на автомобілях, які експлуатуються у важких умовах. Водночас такі трансмісії потребують активної участі водія в процесі керування та мають обмежені можливості адаптації до змін умов руху.

Автоматизовані та гідромеханічні трансмісії дозволяють зменшити навантаження на водія та забезпечити більш плавну роботу автомобіля, однак їх конструкція є складнішою, а втрати енергії – більшими у порівнянні з механічними. Для вантажних автомобілів ці особливості мають принципове значення, оскільки впливають на паливну економічність і надійність трансмісії в цілому.

Для вантажних автомобілів характерною є робота механічної трансмісії в умовах високих і змінних крутних моментів. Це обумовлює застосування посиленних зубчастих передач, валів збільшеного діаметра та надійних підшипникових

вузлів [3]. Коробки передач вантажних автомобілів зазвичай мають більшу кількість передач, що дозволяє точніше підбирати режим роботи двигуна залежно від умов руху і навантаження.

Механічні трансмісії також мають високу придатність до конструктивного удосконалення. Відносна простота їх будови дозволяє впроваджувати додаткові елементи, зокрема керовані фрикційні муфти, без суттєвого ускладнення всієї конструкції. Це відкриває можливість для створення більш ефективних схем розподілу крутного моменту між ведучими мостами.

Автоматизовані та гідромеханічні трансмісії є наступним етапом розвитку систем передачі крутного моменту у вантажних автомобілях. Їх поява пов'язана з прагненням зменшити навантаження на водія, підвищити плавність руху та забезпечити більш стабільну роботу автомобіля в різних умовах експлуатації. На відміну від класичних механічних трансмісій, у цих системах значна частина процесів керування передачею крутного моменту здійснюється автоматично [2].

Автоматизована механічна трансмісія за своєю конструкцією базується на традиційній механічній коробці передач, однак процеси перемикання передач і керування зчепленням виконуються за допомогою електронних та електромеханічних систем. Такий підхід дозволяє зберегти високий коефіцієнт корисної дії механічної трансмісії та одночасно зменшити участь водія у процесі керування.

Гідромеханічні трансмісії відрізняються від механічних і автоматизованих тим, що передача крутного моменту здійснюється з використанням гідравлічних елементів, зокрема гідротрансформатора. Гідротрансформатор забезпечує плавне передавання потужності від двигуна до трансмісії, а також дозволяє автоматично змінювати величину крутного моменту залежно від навантаження [1].

Системи повного приводу займають особливе місце у конструкції вантажних автомобілів підвищеної прохідності. Їх основним призначенням є забезпечення ефективної передачі крутного моменту на декілька ведучих коліс з метою підвищення прохідності автомобіля в складних дорожніх умовах. Застосування повного приводу дозволяє значно покращити тягові можливості автомобіля, зменшити пробуксовування коліс та підвищити стійкість руху [4].

Для вантажних автомобілів системи повного приводу повинні забезпечувати не лише високу прохідність, а й стабільну роботу при значних навантаженнях і тривалих режимах руху. При цьому важливим є збереження прийнятного рівня паливної економічності та мінімізація зносу еле-

ментів трансмісії при русі по дорогах з твердим покриттям [5].

Залежно від способу реалізації повного приводу розрізняють системи з постійним підключенням ведучих мостів, системи з автоматичним підключенням одного з мостів, а також комбіновані схеми, які поєднують елементи обох підходів [1]. Кожна з цих систем має свої переваги та недоліки, що обумовлює необхідність їх детального аналізу.

Система постійного повного приводу характеризується високою прохідністю та стабільною реалізацією тягового зусилля, однак може супроводжуватися підвищеними навантаженнями в трансмісії та зростанням втрат потужності при русі по дорогах з твердим покриттям, що зумовлює необхідність подальшого удосконалення схем повного приводу.

Одним із найбільш ефективних і поширених рішень для реалізації керованого повного приводу у вантажних автомобілях є застосування фрикційних муфт. Використання таких муфт дозволяє здійснювати плавне та кероване підключення ведучих мостів, що є важливою перевагою у порівнянні з жорсткими механічними з'єднаннями.

Фрикційна муфта являє собою механічний пристрій, у якому передача крутного моменту здійснюється за рахунок сил тертя між робочими поверхнями. Залежно від конструкції та способу керування, фрикційні муфти можуть забезпечувати як повне, так і часткове передавання крутного моменту. Це дозволяє регулювати ступінь участі додаткового ведучого моста в роботі трансмісії [5].

У системах повного приводу фрикційні муфти найчастіше застосовуються у складі роздавальних коробок або міжосьових приводів. У нормальних умовах руху муфта може перебувати у розімкненому або частково замкненому стані, передаючи мінімальний крутний момент. При виникненні пробуксовування або збільшенні навантаження муфта поступово замикається, підключаючи додатковий ведучий міст.

Основною перевагою застосування фрикційних муфт є плавність підключення повного приводу. На відміну від жорсткого механічного вмикання, фрикційна муфта дозволяє уникнути ударних навантажень у трансмісії, що позитивно впливає на довговічність її елементів і покращує керованість автомобіля.

Найбільш перспективними для вантажних автомобілів є багатодискові фрикційні муфти, які дозволяють передавати значні крутні моменти при відносно компактних габаритах. Зміна тиску притискання дисків у такій муфті забезпечує регулювання переданого моменту в широких межах,

що дає змогу адаптувати роботу трансмісії до конкретних умов руху [5].

Разом з тим застосування фрикційних муфт має і певні обмеження. Основними з них є теплове навантаження та знос фрикційних поверхонь, які виникають при тривалій роботі у режимі часткового ковзання. Тому при проектуванні та виборі фрикційної муфти необхідно враховувати умови експлуатації автомобіля та забезпечувати належний тепловідвід і ресурс роботи муфти [4].

Наведені дані показують, що застосування фрикційних муфт у системах повного приводу дозволяє усунути основні недоліки жорстких схем підключення ведучих мостів. Саме ці муфти створюють можливість реалізації адаптивних систем повного приводу, які поєднують високу прохідність з гарною керованістю та економічністю.

Висновки. Трансмісія є однією з ключових систем вантажного автомобіля, яка значною мірою визначає його прохідність, керованість, паливну економічність і надійність у процесі експлуатації. Особливо важливою є роль трансмісії для повнопривідних вантажних автомобілів, які працюють у складних дорожніх та кліматичних умовах.

У ході аналізу основних типів трансмісій вантажних автомобілів з'ясовано, що механічні трансмісії залишаються найбільш поширеними завдяки простоті конструкції, високому коефіцієнту корисної дії та здатності працювати з великими крутними моментами. Автоматизовані та гідромеханічні трансмісії забезпечують вищий рівень комфорту та плавності роботи, однак характеризуються підвищеною складністю та, у ряді випадків, зниженням паливної економічності, що обмежує їх застосування у важких умовах експлуатації.

Розгляд систем повного приводу показав, що схеми з постійним підключенням ведучих мостів забезпечують високу прохідність, проте супроводжуються підвищеними втратами потужності, зростанням зносу елементів трансмісії та погіршенням керованості при русі по дорогах з твердим покриттям.

Особливу увагу приділено застосуванню фрикційних муфт у системах повного приводу. Встановлено, що багатодискові фрикційні муфти дозволяють реалізувати плавне та кероване підключення ведучих мостів, зменшити ударні навантаження в трансмісії та покращити експлуатаційні характеристики автомобіля.

Отримані результати обґрунтовують доцільність вибору напрямку удосконалення трансмісії повнопривідного вантажного автомобіля, який полягає у застосуванні керованого повного приводу з використанням фрикційних муфт.

Список літератури:

1. Аналіз сучасних конструкцій трансмісій повнопривідних вантажних автомобілів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування : зб. наук. пр. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. № 2. С. 18–26. DOI:10.20998/2078-6840.2023.2.02.
2. Коломицев В. М. Аналіз будови вантажних автомобілів: технічні рішення для підвищення ефективності та надійності. *Grail of Science*. 2025. № 54. URL: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.22.08.2025.063>.
3. Кохан В. Ф. Аналіз розвитку конструкцій важких колісних тактичних автомобілів. *Sustaining the efficiency of information and vibration technologies*. 2023. № 75. URL: <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.75.01>.
4. Methodology of determining the basic parameters of all-terrain hybrid vehicles / L. Krainyk, A. Kikhtan, Yu. Habriiel, A. Uzhva. *Agroengineering*. 2023. Vol. 27. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.027>.
5. Kikhtan A. Analysis of existing designs and formation of a hybrid drive scheme for wheeled off-road vehicles. *Agroengineering*. 2024. Vol. 28. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.061>.

Kolomytsev V.M. ANALYSIS OF MODERN TRANSMISSION DESIGNS ALL-WHEEL DRIVE TRUCKS

The article is devoted to the analysis of modern designs of transmissions of all-wheel drive trucks and the assessment of their impact on the main operational indicators of off-road vehicles. The purpose and general structure of the truck transmission are considered, its role in ensuring mobility, controllability, fuel economy and reliability in difficult road and climatic operating conditions is determined. The main requirements for transmissions of all-wheel drive cars are summarized, in particular regarding strength, torque distribution efficiency, high efficiency, versatility and control automation.

A comparative analysis of mechanical, automated and hydromechanical transmissions was carried out, their advantages and limitations when used in difficult operating conditions were determined. Mechanical transmissions have been found to remain the most common due to their simplicity of design and high efficiency, while automated and hydromechanical systems provide increased smoothness of operation, but are characterized by greater complexity and dependence on electronic control systems.

Particular attention is paid to the analysis of all-wheel drive systems with constant connection of drive bridges, forced connection and the use of interaxial differentials. Their main shortcomings are systematized, in particular increased power losses, shock loads and design complexity. It has been proven that existing solutions do not always provide an optimal combination of mobility, economy and controllability, which justifies the need for further improvement of transmissions of all-wheel drive trucks. For all-wheel drive trucks, the design of the transmission is complicated by the need to coordinate the operation of several drive axles. Incorrect distribution of torque or rigid connection of bridges in inappropriate driving conditions can lead to power circulation, increased wear of parts and deterioration of the car's handling.

The obtained results form a scientifically based basis for choosing a promising direction of transmission modernization using controlled all-wheel drive and flexible torque distribution between drive axles.

Keywords: *all-wheel drive truck, transmission, all-wheel drive system, mechanical transmission, automated transmission, torque distribution, mobility, performance indicators.*

Дата першого надходження статті до видання: 09.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 629.463.65
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/32>

Ловська А.О.

<https://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

Український державний університет залізничного транспорту

Павлюченко М.В.

<https://orcid.org/0000-0003-0542-7284>

Харківський національний університет міського господарства
імені О.М. Бекетова

Мурад'ян А.О.

<https://orcid.org/0000-0002-6488-6627>

Одеський національний морський університет

Демидюков О.В.

<https://orcid.org/0000-0002-4791-3830>

Одеський національний морський університет

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ТРАПЕЦЕПОДІБНОГО ЗНІМНОГО ДАХУ НАПІВВАГОНА

У статті висвітлено результати досліджень вертикальної навантаженості трапецеподібного знімного даху напіввагона. Для адаптації напіввагонів до перевезень вантажів, що потребують захисту від навколишнього середовища, запропоновано оснащувати їх знімними дахами. При цьому передбачається використання напіввагонів, підлога яких утворена кришками розвантажувальних люків. Розвантаження напіввагона буде здійснюватися самотечією із використанням гравітаційних властивостей вантажу. З метою визначення профілів виконання даху проведено дослідження силових факторів у його каркасі. До уваги прийнято дві схеми навантаження даху: вертикальне навантаження даху від снігу; вертикальне навантаження даху від снігу та двох зосереджених сил. Визначення силових факторів у каркасі даху проведено у програмному комплексі Ліра – САПР. Встановлено, що максимальний згинальний момент у каркасі даху має місце при другій схемі навантаження і склав $0,42 \text{ кН}\cdot\text{м}$. За моментом опору поперечного перерізу обрано профіль виконання каркасу даху – швелер №5.

Проведено розрахунок на міцність знімного даху напіввагона із використанням методу скінчених елементів. Встановлено, що при сприйнятті дахом вертикального навантаження від снігу найбільша концентрація напружень спостерігається в середній частині поздовжньої балки каркасу, але ці напруження на 62,6% нижче за допустимі.

При сприйнятті дахом вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил максимальні напруження в ньому на 8,8% нижчі за допустимі і виникають в зоні прикладення двох зосереджених сил.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування конструкцій залізничних транспортних засобів та підвищенню ефективності залізничних перевезень.

Ключові слова: залізничний транспорт, знімний дах напіввагона, проектування знімного даху, навантаженість знімного даху, міцність знімного даху.

Постановка проблеми. Залізничний транспорт вже тривалий час є не тільки провідною складовою транспортної галузі, а і стратегічною. На долю залізничного транспорту припадає досить різноманітний сегмент перевезень вантажів народного господарства. Вже тривалий час

Україна є провідним експортером зерна у європейські країни. Для перевезень зернових залізницею використовуються здебільшого вагони-хопери, а також контейнери. Однак в останні роки рівень поповнення інвентарного парку цими транспортними засобами є досить невеликим. Тому вини-

кає необхідність пошуку альтернативних рішень, які дозволять забезпечити ефективність процесу перевезень не тільки зернових, а і інших типів вантажів, що потребують захисту від атмосферних опадів, залізничним транспортом. Оскільки найбільш поширеним типом вагонів на сьогоднішній день є напіввагони, то доцільним є адаптація їх конструкцій до перевезень таких вантажів. При цьому найбільш раціональним рішенням є використання під такі цілі напіввагонів, підлога яких утворена кришками розвантажувальних люків. Це дозволило б спростити процес розвантаження. Однак потребує вирішення питання забезпечення схоронності вантажу від впливу навколишнього середовища. Тому необхідним є впровадження знімного даху для напіввагона. Конструкція такого даху повинна мати невелику тару щоб не значно збільшувати підресорену масу його конструкції. У зв'язку із цим, актуальним постає питання проектування даху напіввагона, модернізованого під перевезення вантажів, що потребують захисту від атмосферного впливу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Raffaele Sepe та Angela Pozzi проводили дослідження навантаженості даху вагона-рефрижератора [1]. Дане дослідження включало визначення напруженого стану даху, його стійкості та вібраційний аналіз. На підставі проведених розрахунків авторами виявлено недоліки конструкції даху та перспективи його подальшого удосконалення. Недоліком цієї конструкції даху є і те, що він не може використовуватися на напіввагоні.

Дослідження напруженого стану даху вагона при падінні на нього вантажу вагою 100 кг наведено у статті J. Cuartero, A. Miravete та R. Sanz [2]. При цьому авторами застосовано скінчено-елементний аналіз. До уваги прийнято два варіанти конструкційного виконання даху: із алюмінію та композиту. Недоліком таких конструкцій дахів є значна вартість виготовлення. Це стримує серійність їх впровадження в експлуатацію.

Сулим А. із колегами запропонували шляхи удосконалення несучих конструкцій вантажних вагонів, які сприятимуть підвищенню ефективності їх експлуатації [3]. Разом із цим, авторами не розглянуто питання модернізації напіввагонів для можливості їх залучення до перевезень вантажів, що потребують захисту від атмосферних опадів.

Фомін О. та Стецько А. провели дослідження міцності даху спеціалізованого вагона при прийнятті вертикальних навантажень [4]. Розрахунок проведено не тільки теоретичним, а і експери-

ментальним шляхом. Результати проведених розрахунків мають добру узгодженість. Разом із цим, питання удосконалення конструкції даху вагона авторами не проводилося.

Ловською А. О. із колегами запропоновано конструкцію даху залізничного вагона, яка має трикутний переріз [5]. Висвітлено особливості проектування такого даху, а також результати розрахунку на міцність при деяких схемах його навантажень в експлуатації. Однак дах спроектовано для критого вагона. Щодо конструкції даху для напіввагона подібні дослідження авторами не проводилися.

Також Ловська А. О. із колегами проводили оптимізацію параметрів вертикальних стійок вагона для перевезень зерна [6]. Проведені дослідження дозволили зменшити тару несучої конструкції вагона-хопера у порівнянні із прототипом. Разом із цим, автори не досліджували можливості оптимізації параметрів каркасу даху напіввагона для зменшення його тари.

Підсумовуючи результати аналізу наукових джерел [1 – 6] можна зробити висновок, що питання проектування знімних дахів напіввагонів для можливості їх залучення до перевезень вантажів, що потребують захисту від атмосферного впливу, вимагають подальших досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є висвітлення особливостей визначення вертикальної навантаженості знімного даху напіввагона, модернізованого під перевезення вантажів, що потребують захисту від атмосферного впливу. Досягнення зазначеної мети реалізоване шляхом розв'язку таких завдань:

- побудувати епюри силових факторів в каркасі знімного даху напіввагона;
- провести розрахунок на міцність знімного даху напіввагона.

Виклад основного матеріалу. Для можливості використання напіввагонів під перевезення вантажів, що потребують захисту від атмосферного впливу, пропонується оснащення їх знімним дахом. Пропонований переріз каркасу даху наведено на рис. 1.

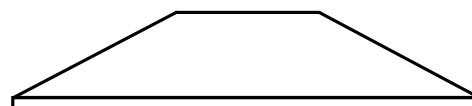


Рис. 1. Переріз даху напіввагона

Для визначення профілів виконання даху проведено дослідження силових факторів у його каркасі. До уваги прийнято дві схеми навантаження даху:

- вертикальне навантаження даху від снігу;
- вертикальне навантаження даху від снігу та двох зосереджених сил по 1 кН кожна, розподілених на майданчику 0,25х0,25 м та доданих на відстані 0,5 м одна від одної.

Визначення силових факторів у каркасі даху проведено у програмному комплексі Ліра – САПР. Дах розглянуто як стрижневу систему, яка кріпиться за периметром. Така схема закріплення моделює схему кріплення даху до верхнього обв'язування кузова напіввагона. Геометричні параметри даху було визначено виходячи із геометричних параметрів кузова. У якості прототипу обрано напіввагон 12-757.

Розрахункові схеми каркаса даху при сприйнятті ним вертикального навантаження P_v від снігу наведено на рис. 2, а). На рис. 2, б) наведено розрахункову схему каркаса даху при сприйнятті ним вертикального навантаження P_v від снігу, а також двох зосереджених сил P_c .

При цьому вертикальне навантаження P_v , яке діє на дах, враховує вертикальну статичну та динамічну складову. Динамічна складова визначалась за методикою, наведеною у нормативному документі [7].

На підставі проведених розрахунків отримано епюри силових факторів у даху при розглянутих розрахункових схемах його навантажень (рис. 3).

Аналізуючи дані епюри можна зробити висновок, що максимальний згинальний момент в каркасі даху від вертикального навантаження склав 0,359 кН·м. Цей згинальний момент є додатнім та виникає у похилому поясі.

Максимальний згинальний момент у каркасі даху при сприйнятті вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил склав 0,42 кН·м, має від'ємне значення та зосереджений у горизонтальному поясі.

За отриманим значенням згинального моменту M визначено момент опору W поперечного перерізу даху

$$W = \frac{M}{\sigma}, \quad (1)$$

де σ – напруження в каркасі даху, кПа.

При цьому, за умови того, що матеріалом виготовлення каркасу даху є сталь марки 09Г2С, тоді $[\sigma] = 210$ МПа [7].

З урахуванням цього $W \approx 2,0$ см³. За визначеним значенням моменту опору, використовуючи сортамент прокатних сталей, обрано профіль

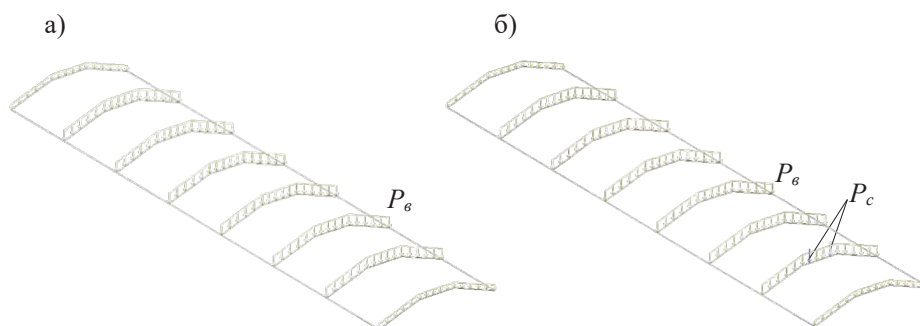


Рис. 2. Розрахункова схема каркасу даху
а) при сприйнятті вертикального навантаження від снігу; б) при сприйнятті вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил

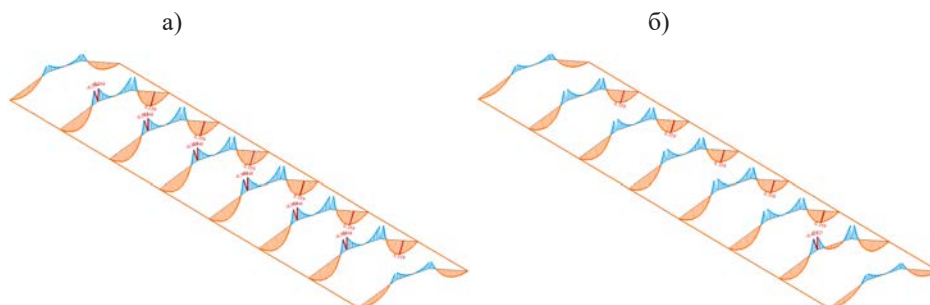


Рис. 3. Епюри згинальних моментів у каркасі даху (кН·м)
а) при сприйнятті вертикального навантаження від снігу; б) при сприйнятті вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил

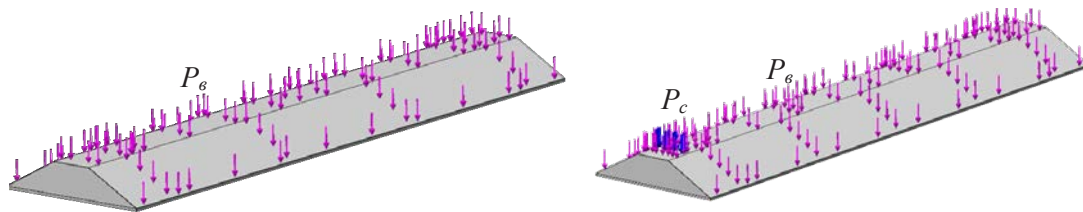


Рис. 4. Розрахункова схема даху напіввагона а) вертикальне навантаження від снігу; б) вертикальне навантаження від снігу та двох зосереджених сил

виконання каркасу даху – швелер №5, який має момент опору поперечного перерізу $W=2,75 \text{ см}^3$.

Для дослідження міцності даху з каркасом запропонованої конструкції проведено його розрахунок за методом скінчених елементів. При цьому застосовано програмний комплекс SolidWorks Simulation. Розрахунковим критерієм обрано критерій фон Мізеса [8].

Враховано, що обшивка даху має товщину 1,5 мм, як і в конструкції прототипу. Розрахункові схеми даху наведено на рис. 4. На рис. 4, а) наведено розрахункову схему даху при сприйнятті вертикального навантаження P_c . А на рис. 4, б) – розрахункову схему даху при сприйнятті вертикального навантаження P_c (фіолетовий колір), а також двох зосереджених сил P_c (синій колір), по 1 кН кожна.

Скінчено-елементну модель даху утворено тетраедральними елементами. Їх оптимальну чисельність визначено графоаналітичним способом. Модель налічує 39183 елемент та 77655 вузлів.

Закріплення даху здійснювалось за периметром, в зонах його контакту з обв'язуванням верхнім кузовом напіввагона. При цьому застосовано жорсткий зв'язок. На підставі проведених розрахунків встановлено, що найбільша концентрація напружень спостерігається в середній частині повздовжньої балки каркасу і кутових частинах даху (рис. 5). Ці напруження склали 78,6 МПа (рис. 8), що нижче за допустимі на 62,6%.

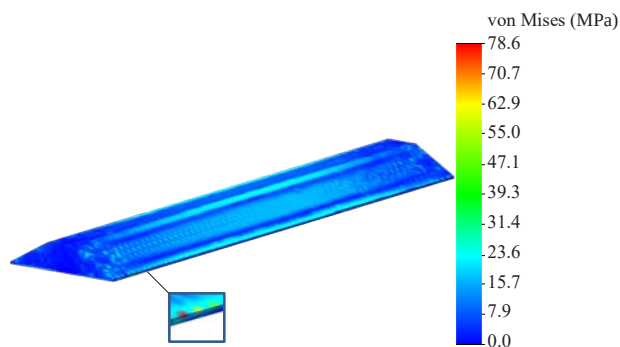


Рис. 5. Напружений стан даху напіввагона

Найбільші переміщення в даху зосереджені в його середній частині і склали близько 1,8 мм (рис. 6).

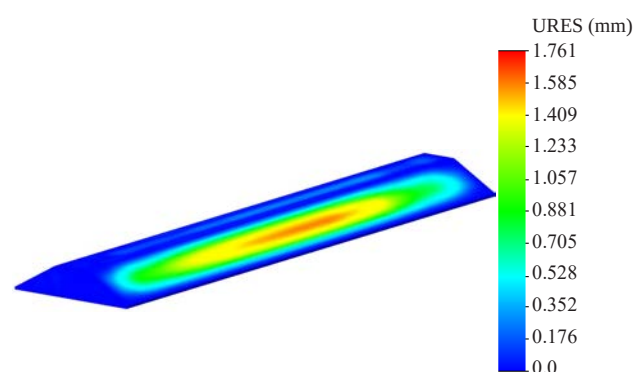


Рис. 6. Переміщення в вузлах даху напіввагона

Рис. 6. Переміщення в вузлах даху напіввагона

При розрахунку на міцність даху за умови сприйняття вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил максимальні напруження зафіксовано в зоні прикладення двох зосереджених сил (рис. 7).

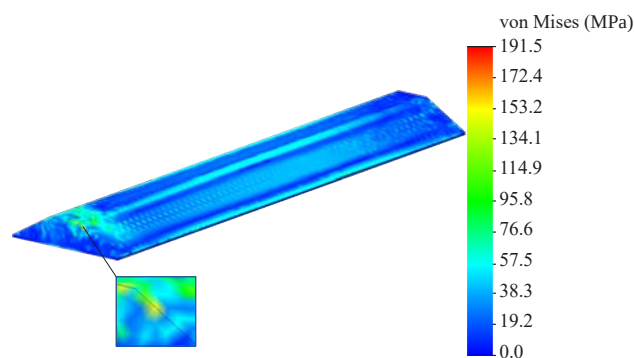


Рис. 7. Напружений стан даху напіввагона

Дані напруження склали 191,5 МПа. Отримані напруження на 8,8% нижчі за допустимі. Максимальні переміщення в даху виникають також в зоні прикладення двох зосереджених сил і складають 8,2 мм (рис. 8).

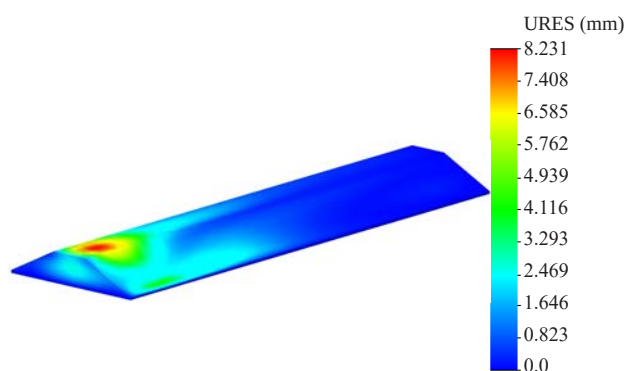


Рис. 8. Переміщення в вузлах даху напіввагона

Проведені розрахунки на міцність даху дозволяють зробити висновок, що його міцність при розглянутих розрахункових схемах дотримується.

За необхідності дах може бути обладнаний пристроями для його обслуговування: перехідний майданчик для обслуговуючого персоналу, скоби для закріплення підйомно-транспортного устаткування тощо.

Подальший розвиток даного дослідження полягає у постановці на дах завантажувальних люків. Це дозволить здійснювати завантаження кузова, а також його розвантаження через нижні розвантажувальні люки, без демонтажу даху.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проєктування кон-

струкцій залізничних транспортних засобів та підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

Висновки

1. Побудовано епюри силових факторів в каркасі знімного даху напіввагона. Встановлено, що максимальний згинальний момент у каркасі даху склав 0,42 кН·м, має від'ємне значення та зосереджений у горизонтальному поясі каркасу. За моментом опору поперечного перерізу обрано профіль виконання каркасу даху – швелер №5, який має момент опору поперечного перерізу $W=2,75 \text{ см}^3$.

2. Проведено розрахунок на міцність знімного даху напіввагона. При сприйнятті дахом вертикального навантаження від снігу найбільша концентрація напружень спостерігається в середній частині поздовжньої балки каркасу і кутових частинах даху. Напруження в цих зонах склали 78,6 МПа. Отримані напруження нижче за допустимі на 62,6%. Найбільші переміщення в даху зосереджені в його середній частині і склали близько 1,8 мм.

При сприйнятті дахом вертикального навантаження від снігу та двох зосереджених сил максимальні напруження в ньому склали 191,5 МПа. Дані напруження виникають в зоні прикладення двох зосереджених сил, однак вони на 8,8% нижчі за допустимі. Максимальні переміщення в даху виникають також в зоні прикладення двох зосереджених сил і складають 8,2 мм.

Список літератури:

1. Raffaele Sepe, Angela Pozzi. Static and modal numerical analyses for the roof structure of a railway freight refrigerated car. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2015. Vol. 33. P. 451 – 462. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.33.50
2. J. Cuartero, A. Miravete, R. Sanz. Design and calculation of a railway car composite roof under concrete cube crash. *International Journal of Crashworthiness*. 2011. Vol. 16(1). P. 41 – 47. DOI: 10.1080/13588265.2010.501163
3. Sulym Andrii, Safronov Oleksandr, Strynzh Andrii, Khozia Pavlo. Ways of improving of freight car design. *Transport systems and technologies*. 2024. Vol. (43). P. 47 – 60. DOI: 10.32703/2617-9059-2024-43-4
4. Фомін О., Стецько А. Визначення засобів з протидії експлуатаційним пошкодженням несучих систем вагона-термоса моделі ТН 4-201. *Транспортні системи і технології*. 2018. Вип. 32. Т.1. С. 135 – 146.
5. Alyona Lovska, Iraida Stanovska, Ihor Prokopovych, Ihor Sydorenko, Arsen Muradian. Determining patterns of the vertical load on a covered wagon roof with a frame in the form of a triangular arch. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. №4/7 (130). P. 6 – 13. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.308905
6. Alyona Lovska, Glib Vatulia, Mykhailo Pavliuchenkov, Parag Vichare, Tony Leslie. Optimization of the Body Strut of the Grain Hopper Wagon. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1376. 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/1376/1/012037
7. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проєктування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.
8. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навч. посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.

Lovska A.O., Pavliuchenkov M.V., Muradian A.O., Demydiakov O. V. FEATURES OF DETERMINING THE VERTICAL LOADING OF A TRAPEZOID-SHAPED REMOVABLE ROOF OF AN OPEN WAGON

The article highlights the results of research into the vertical loading of the trapezoidal removable roof of an open wagon. To adapt open wagons to the transportation of cargo requiring environmental protection, it is

proposed to equip them with removable roofs. In this case, it is planned to use open wagons, the floor of which is formed by the covers of unloading hatches. Unloading of the open wagon will be carried out by gravity using the gravitational properties of the cargo. In order to determine the profiles of the roof, a study of the force factors in its frame was conducted. Two roof load schemes were taken into account: vertical load of the roof from snow; vertical load of the roof from snow and two concentrated forces. Determination of force factors in the roof frame was carried out in the Lira – CAD software complex. It was established that the maximum bending moment in the roof frame occurs with the second load scheme and was 0.42 kN m. According to the moment of resistance of the cross section, the profile of the roof frame was selected – channel No. 5.

The strength of the removable roof of an open wagon was calculated using the finite element method. It was found that when the roof perceives a vertical load from snow, the greatest concentration of stresses is observed in the middle part of the longitudinal beam of the frame, but these stresses are 62.6% lower than the permissible ones.

When the roof perceives a vertical load from snow and two concentrated forces, the maximum stresses in it are 8.8% lower than the permissible ones and arise in the area of application of two concentrated forces.

The conducted research will contribute to the creation of developments in the design of railway vehicle structures and increasing the efficiency of railway transportation.

Keywords: *railway transport, removable roof of an open wagon, design of a removable roof, loading of a removable roof, strength of a removable roof.*

Дата першого надходження статті до видання: 18.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Степанов О.В.<https://orcid.org/0000-0003-4954-2532>

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Волобуєва Т.В.<https://orcid.org/0000-0003-0340-3326>

Одеська державна академія будівництва та архітектури

БЕЗПЕКА НА ТРАНСПОРТІ: КЛЮЧОВИЙ ФАКТОР РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

У статті розглянуто безпеку на транспорті як ключовий фактор розвитку транспортних систем. Метою статті є оцінка безпеки на транспорті як ключового фактора розвитку транспортної системи та її значення у контексті інфраструктурних, соціальних, економічних та екологічних аспектів. Показано, що безпека на транспорті має комплексний характер і охоплює технічні, інфраструктурні, організаційні, соціальні та нормативно-правові аспекти. Крім того, визначає надійність, стійкість і ефективність функціонування транспортної системи загалом. Особливу увагу приділено ролі сучасних технологій, зокрема систем допомоги водієві (ADAS), автоматизованого та автономного керування, а також моніторингу на основі IoT і телематики, які забезпечують збір і аналіз даних у режимі реального часу, прогнозування ризиків та оптимізацію транспортних і логістичних процесів. Проаналізовано значення інфраструктурних заходів безпеки, системами відеоспостереження та інтелектуальними транспортними системами. Обґрунтовано важливість організаційних і правових механізмів. Підкреслено соціальний вимір безпеки на транспорті, зокрема роль людського фактора, професійної надійності водія та інформаційного середовища дорожнього руху. Визначено, що безпека на транспорті є частиною національної безпеки та передумовою економічної стійкості, екологічної збалансованості й підвищення якості життя населення. Зниження аварійності сприяє скороченню соціально-економічних втрат, підвищенню довіри до громадського транспорту та формуванню сталих мобільних практик. Зроблено висновок про необхідність системного, міждисциплінарного та довгострокового підходу до забезпечення безпеки на транспорті як інтегральної властивості транспортної системи.

Ключові слова: безпека на транспорті, транспортна система, сучасні технології, розвиток, інфраструктура, організаційний механізм.

Постанова проблеми. Сучасна транспортна система є складною соціально-економічною структурою, яка об'єднує різні види транспорту, забезпечує мобільність людей та матеріальних ресурсів. Вона формує умови для функціонування внутрішнього ринку й інтеграції у глобальні ланцюги постачання. В умовах зростання обсягів перевезень, інтенсифікації логістичних операцій, глобалізації торгівельних процесів та технологічного переозброєння, ефективність, надійність і стійкість такої системи визначаються багатьма чинниками, серед яких центральне місце займає безпека на транспорті.

Безпека на транспорті стає не просто галузевим напрямом, але й важливою передумовою для функціонування, розвитку, модернізації та інтеграції тран-

спортної системи. Безпека визначає рівень надійності транспортних операцій, ступінь ризику для учасників руху, обсяг можливих економічних збитків, ступінь екологічного впливу та індекс довіри користувачів.

Безпека на транспорті постає інтегрованим елементом транспортної системи, що взаємодіє з усіма її компонентами: інфраструктурою, рухомим складом, організаційними механізмами, людським фактором та нормативно-правовою базою. Її недостатній рівень призводить до збоїв у роботі транспортного комплексу, підвищення аварійності, економічних втрат і суспільних ризиків. Саме тому безпеку на транспорті слід розглядати як стратегічний ресурс розвитку галузі, що визначає її стійкість та здатність забезпечувати надійні перевезення в сучасних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні аспекти безпеки транспортної сфери були досліджені різними вітчизняними науковцями, серед яких Андрієнко В. М., Бойко П. П., Гречанюк Р. Ю., Деркач С. А., Зюбрик Ю. М., Кириленко І. В., Пономаренко С. В., Рудик М. М., Самсонкін В. М., Савчук М. І. й ін. У різнопланових працях [2, 4, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 17–23, 25] було показано, що інтеграція інфраструктурних, організаційних, технологічних та поведінкових заходів забезпечує суттєве зниження аварійності та тяжких наслідків дорожніх транспортних пригод. Дослідники відзначають, що безпека на транспорті стає не тільки структурним елементом транспортної системи, але виступає й фундаментальною властивістю транспортної системи.

Провідною концепцією останніх років є підхід *Safe System* (безпечна система) [20–22]. Цей підхід ґрунтується на визнанні обмеженості людського фактора та відповідальності транспортної системи за мінімізацію наслідків помилок учасників дорожнього руху. Концепція *Safe System* [22] наголошує, що найбільший ефект досягається через інженерні та управлінські рішення.

Соціальні аспекти безпеки на транспорті досліджуються й у контексті громадського транспорту [19]. Дослідники доводять, що відчуття безпеки пасажирів тісно пов'язане з якістю транспортних послуг. При цьому низький рівень безпеки на транспорті знижує готовність користуватися громадським транспортом. Розгляд інфраструктурного компонента [21] довів, що безпечна дорожня інфраструктура сприяє зниженню аварійності, покращенню громадського здоров'я та підвищенню якості життя.

Таким чином, сучасні наукові джерела підтверджують, що безпека на транспорті є ключовим фактором, який визначає рівень довіри користувачів, соціальну та економічну ефективність. Тобто безпека на транспорті безпосередньо впливає на ефективність всієї транспортної системи.

Постановка завдання. Метою статті є оцінка безпеки на транспорті як ключового фактора розвитку транспортної системи та її значення у контексті інфраструктурних, соціальних, економічних та екологічних аспектів.

Виклад основного матеріалу. Транспортні системи, які є важливою частиною економічної та соціальної інфраструктури сучасної держави, поступово набувають більшої складності. Вони забезпечують мобільність населення, логістичну інтеграцію виробництва та торгівлі, а також взаємодію регіональних та міжнародних транспорт-

них коридорів [1]. Зокрема, посилюється урбанізація, зростає обсяг перевезень, при цьому впровадження цифрових технологій і автоматизованих систем керування вимагає нових підходів до забезпечення безпеки на транспорті [2].

Безпека на транспорті є ключовим фактором ефективного функціонування транспортних систем та розвитку національної економіки. Безпека на транспорті, як комплексна характеристика, включає технічні, організаційні, поведінкові та нормативно-правові аспекти, визначає стійкість і надійність транспортної системи в цілому [23, 24].

Для підвищення рівня безпеки на транспорті застосовуються технологічні та інфраструктурні заходи. До технологічних рішень належать системи допомоги водієві (*ADAS*), автоматизація та автономне управління транспортом [25]. Вагомою допомогою став моніторинг через *IoT* (*Internet of Things*) і телематика [1]. Відзначимо, що *IoT* – це технологічна парадигма, так звана «модель мислення». У межах цієї програми фізичні об'єкти (пристрої, машини, обладнання) оснащуються датчиками, мережевими модулями та програмним забезпеченням, що дозволяє їм збирати дані, обмінюватися інформацією та взаємодіяти між собою через інтернет без участі людини.

Моніторинг через *IoT* – це комплексний підхід до збору, передавання, оброблення та аналізу даних у режимі реального часу за допомогою мережі взаємопов'язаних датчиків, пристроїв і телематичних модулів [26]. Зокрема, моніторинг *IoT* – це збір даних у реальному часі, телематика та передавання даних через мобільні мережі (*4G/5G*), супутникові канали або спеціальні протоколи зв'язку (*LPWAN*, *NB-IoT*), аналітика та прогнозування, підвищення безпеки руху, оптимізація логістичних процесів, цифрові платформи управління автопарком у режимі 24/7.

Інфраструктурні заходи безпеки на транспорті охоплюють забезпечення дорожнього покриття, належного освітлення та чіткої дорожньої розмітки. Крім того, встановлення сучасних систем відеоспостереження й автоматичної фіксації порушень, а також упровадження розумних транспортних систем, які здатні аналізувати трафік і прогнозувати потенційно аварійні ситуації [27].

Організаційні та правові механізми передбачають підготовку та сертифікацію водіїв. При цьому особлива увага приділяється контролю за дотриманням Правил дорожнього руху, страхування транспортних ризиків та державному регулюванню [4, 11].

Розглянемо безпеку на транспорті як ключовий фактор розвитку транспортної системи.

Під поняттям «безпека на транспорті» слід розуміти сукупність заходів, норм, технологій та управлінських рішень, що спрямовані на запобігання інцидентам, аваріям, зменшення ризиків для користувачів транспорту – учасників дорожнього руху в цілому. У наукових джерелах безпека на транспорті розглядається як частина соціального, економічного та національного масштабу [4–7]. При цьому безпека на транспорті охоплює не лише дорожню безпеку, але й безпеку інфраструктури, транспортних засобів, перевезень, вантажів, а також нормативно-організаційні, інформаційні та екологічні аспекти.

Відзначимо, що безпека на транспорті виконує роль фактора, без якого неможлива довготривала стабільність та розвиток транспортної системи. Якщо транспорт не забезпечує безпечних умов для учасників дорожнього руху, тобто зростає ризик аварій, загибелі та травматизму, тоді знижується довіра до системи, зростає соціальна й економічна вартість як для окремих громадян, так і для держави в цілому. У цьому випадку безпека на транспорті стає не просто елементом функціонування, а і критичною передумовою розвитку, модернізації, підвищення якості обслуговування, інвестування у транспортну інфраструктуру та довгострокове планування [9–10].

У контексті сучасних трансформацій (урбанізація, зростання попиту на мобільність, екологічні виклики, інтеграція різних видів транспорту, розвиток громадського транспорту тощо) безпека на транспорті стає дієвим інструментом для забезпечення сталого розвитку та зниження негативних соціально-економічних наслідків від транспортних ризиків. Відповідно до цього Генеральна Асамблея ООН своєю Резолюцією A/RES/74/299 «Improving global road safety» (вересень 2020 року) проголосила Друге Десятиліття дій щодо забезпечення безпеки дорожнього руху 2021–2030 рр. з цільовим показником зниження смертей та серйозних травм на 50% до 2030 року [8].

Розглядаючи інтеграцію безпеки у розвиток транспортної системи України відзначимо, що одним із ключових напрямів забезпечення безпеки на транспорті є впровадження сучасних технічних рішень як для транспортних засобів, так і для дорожньої-транспортної інфраструктури [9, 10]. Це може охоплювати широкий спектр заходів, спрямованих на підвищення рівня безпеки на транспорті. Зокрема, стандартизація конструк-

тивних елементів транспортних засобів, розвиток технологій активної та пасивної безпеки, упровадження сучасних систем автоматизованої допомоги водієві та покращення загальної надійності транспортних модулів.

Водночас важливим напрямом є модернізація підходів до проектування автомобільних доріг та комплексне удосконалення організації дорожнього руху. Це передбачає впровадження сучасних інфраструктурних рішень, які орієнтовані на мінімізацію ризиків та створення максимально безпечних умов для всіх учасників руху. Йдеться про формування зручних і захищених просторів для пішоходів та велосипедистів, підвищення безпеки водіїв приватного транспорту, а також забезпечення ефективного й стабільного функціонування громадського транспорту.

Не менш значущим аспектом для безпеки на транспорті виступає формування якісного інформаційного середовища. Впорядкована система дорожніх знаків, зрозумілі схеми руху, чіткі маршрути та дотримання оптимальних режимів швидкості сприяють зниженню ризиків, підвищують передбачуваність дорожніх ситуацій і створюють умови для безпечного переміщення у транспортній мережі [12, 13]. Такі заходи створюють передумови для зниження аварійності, травматизму, що підвищує якість, привабливість та надійність транспортної системи в цілому.

Безпека на транспорті – це не лише технічні параметри чи стан інфраструктури, а й широка соціальна та організаційна система, яка охоплює взаємодію людей, технологій і норм [10]. У наукових працях, які присвячені безпеці дорожнього руху, наголошується, що ключову роль відіграє професійна надійність водія, його психофізіологічний стан, рівень підготовки, здатність адекватно реагувати на складні ситуації та усвідомлення соціальної відповідальності під час керування транспортним засобом [14].

Для стабільного функціонування транспортної системи держави безпека на транспорті розглядається як частина національної безпеки, оскільки її рівень безпосередньо впливає на економічну стійкість, мобільність населення та ефективність логістики [9, 10]. Це потребує належного нормативного регулювання, дієвого адміністрування, достатнього ресурсного забезпечення й чіткої організації. У цьому контексті правові механізми, державний нагляд, системний контроль, стандарти та регламенти стають ключовими інструментами підтримання високого рівня безпеки на транспорті [11].

Відомо, що безпечна й надійна транспортна система суттєво підвищує довіру громадян до громадського транспорту, стимулюючи його регулярне використання та формуючи стійкі мобільні звички. Завдяки цьому зменшується залежність від приватного автотранспорту, що позитивно впливає на інтенсивність дорожнього руху, скорочує затори й підвищує пропускну спроможність вулично-дорожньої мережі. У комплексі такі зміни сприяють зниженню рівня забруднення повітря, скороченню викидів парникових газів і формуванню довгострокової екологічної стійкості транспортної системи [15, 16].

Крім того, зниження рівня аварійності та травматизму безпосередньо сприяє скороченню соціальних й економічних втрат держави. Менша кількість дорожніх інцидентів зменшує навантаження на медичну систему, скорочує витрати на лікування постраждалих та реабілітацію, а також зменшує обсяг втраченого робочого часу. У довгостроковій перспективі це знижує ризики погіршення демографічної ситуації та підвищує загальну якість життя населення.

Інноваційні дослідження у сфері безпеки на транспорті, зокрема в межах концепції сталого й розумного транспорту, дедалі більше орієнтовані на системний, комплексний підхід. Йдеться про розгляд безпеки не як набору ізольованих технічних чи організаційних заходів, а як інтегральної, невіддільної властивості всієї транспортної системи, що формується під впливом багатьох взаємопов'язаних факторів. Такий підхід передбачає налагоджену співпрацю між державними органами, місцевим самоврядуванням, транспортними операторами, фахівцями з міського планування, громадськістю, науковими та дослідницькими установами.

Спільні зусилля різних учасників транспортної сфери дають змогу формувати цілісну стратегію розвитку безпеки на транспорті, яка орієнтована на довгострокову перспективу. Такі підходи охоплюють технічні аспекти модернізації

інфраструктури, враховують поведінкові характеристики учасників дорожнього руху, дотримання екологічних стандартів, оцінку соціальних ризиків і економічних витрат, а також інтеграцію новітніх технологій.

Висновки. У даному дослідженні розглянуто безпеку на транспорті, яка становить базову умову стабільного, результативного та довготривалого розвитку транспортної системи. Встановлено, що за відсутності належного рівня безпеки на транспорті будь-які зусилля щодо її модернізації, удосконалення чи розширення втрачають свою ефективність.

З'ясовано, що безпека на транспорті, як системна характеристика функціонування транспортних комплексів, ґрунтується на активному впровадженні інноваційних технологій, цифрових рішень і сучасних управлінських підходів. Реалізація комплексної державної та галузевої політики у сфері транспорту перетворює безпеку на транспорті на ключовий фактор розвитку транспортної системи.

Обґрунтовано, що підвищення рівня безпеки на транспорті формує суттєві соціально-економічні й екологічні переваги та зміцнює довіру суспільства до транспортної системи. Забезпечення безпечних перевезень стимулює зростання мобільності населення, полегшує доступ до трудових, освітніх і соціальних ресурсів, сприяє підвищенню якості життя та створює передумови для сталого розвитку регіонів і територій.

Визначено підходи до безпеки на транспорті як ключового фактора розвитку транспортної системи. Доведено, що підхід до забезпечення безпеки на транспорті має бути комплексним та охоплювати всі рівні: технічний (стан транспортних засобів та інфраструктури); організаційний (системи управління рухом, стандарти, контроль); соціальний (поведінка учасників дорожнього руху); нормативно-правовий та стратегічний рівень, що є актуальною тематикою подальших досліджень.

Список літератури:

1. Кушнір Л. П., Гречанюк Р. Ю., Сербул-Великий І. С. Перспективи використання та розвитку міжнародних транспортних коридорів як елемент підвищення логістичної привабливості України // *Економіка та суспільство*. 2022. № 45. С. 45–57. DOI: 10.32782/2524-0072/2022-45-79.
2. Silva R. M., Azevedo G. F., Berto M. V. V. та ін. Vulnerable road user detection and safety enhancement: A comprehensive survey. arXiv, 2024. arXiv:2405.19202. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.19202> (дата звернення: 29.12.2025).
3. Abdul-Yekeen A. M., Rasag O., Kujore V. та ін. Utilizing the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence, Machine Learning, and Vehicle Telematics for Sustainable Growth in Small and Medium Firms (SMEs) // *Journal of Knowledge Learning and Science Technology*. 2024. Vol. 3, No. 4. P. 22–34. DOI: 10.60087/jkltst.vol3.n4.p22.

4. Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф., м. Кривий Ріг, 13 листоп. 2020 р. Кривий Ріг, 2020. 299 с.
5. Транспортні засоби – Тезаурус «EUROVOC». Офіційний портал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/euro> (дата звернення: 29.12.2025).
6. Рудик М. М. Зарубіжний досвід забезпечення безпеки на автомобільному транспорті та можливості його використання в Україні // *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2025. Т. 2, № 4. Розд. 7. DOI: 10.24144/2788-6018.2025.04.2.52.
7. Szczukowski M. Safety in transportation: a review of the concept, its context, safety preservation and improvement effectiveness // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2017. Vol. 95. P. 197–212. DOI: 10.20858/sjsutst.2017.95.18.
8. World Health Organization; United Nations Regional Commissions. Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2021–2030. Geneva : WHO, 2021. URL: <https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030> (дата звернення: 29.12.2025).
9. Стратегія підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.10.2020 № 1360-р // *Урядовий кур'єр*. 04.11.2020. № 214.
10. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025–2027 роках : постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 № 1550 (ред. від 13.03.2025). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-п> (дата звернення: 29.12.2025).
11. Степанов О. В., Кобзар І. Ю. Організаційно-правовий механізм регулювання безпеки автотранспорту в транспортному процесі // *Вісник ХНТУ*. 2024. № 2. С. 85–89.
12. Acerra E. M., Lantieri C., Vignali V., Pazzini M. Safety roads: the analysis of driving behaviour and the effects on the infrastructural design // *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 69. P. 336–343. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.180.
13. Fiolic M., Babić D., Tomasović S. Effect of road markings and road signs quality on driving behaviour, driver's gaze patterns and driver's cognitive load at night-time // *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2023. Vol. 99. P. 306–318. DOI: 10.1016/j.trf.2023.10.025.
14. Zaranka J., Pečeliūnas R., Žuraulis V. A road safety-based selection methodology for professional drivers: Behaviour and accident rate analysis // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, No. 23. Art. 12487. DOI: 10.3390/ijerph182312487.
15. Ibrahim M. N., Logan D. B., Koppel S., Fildes B. The role of safety in modal choice and shift: A transport expert perspective in the state of Victoria (Australia) // *PLOS ONE*. 2023. Vol. 18, No. 4. e0280949. DOI: 10.1371/journal.pone.0280949.
16. Ribeiro P. J. G., Dias G., Mendes J. F. G. Decarbonizing urban mobility: A methodology for shifting modal shares to achieve CO₂ reduction targets // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 16. Art. 7049. DOI: 10.3390/su16167049.
17. Pustiulha S., Samchuk V., Prydiuk V. та ін. Improving safety criteria for transporting hazardous goods by road through optimizing the geometric parameters of their stowage // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3, No. 3(129). P. 74–84. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.307235.
18. Samsonkin V., Goretskyi O., Matsiuk V. та ін. Development of an approach for operative control over railway transport technological safety based on the identification of risks in the indicators of its operation // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.184162.
19. Friman M., Lättman K., Olsson L. E. Public transport quality, safety, and perceived accessibility // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 9. Art. 3563. DOI: 10.3390/su12093563.
20. Khan M. N., Das S. Advancing traffic safety through the safe system approach: A systematic review // *Accident Analysis & Prevention*. 2024. Vol. 199. Art. 107518. DOI: 10.1016/j.aap.2024.107518.
21. Roadway safety, design & equity: A paradigm shift // *Journal of Transport & Health*. 2021. Vol. 23. Art. 101260. DOI: 10.1016/j.jth.2021.101260.
22. Soames Job R. F., Truong J., Sakashita C. The ultimate Safe System: Redefining the Safe System approach for road safety // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 5. Art. 2978. DOI: 10.3390/su14052978.
23. Behboudi N., Moosavi S., Ramnath R. Recent advances in traffic accident analysis and prediction: A comprehensive review of machine learning techniques // *arXiv*. 2024. arXiv:2406.13968. URL: <https://arxiv.org/abs/2406.13968> (дата звернення: 29.12.2025).
24. European Commission. Road Safety Thematic Report – Safe System Approach. Brussels, 2023. URL: <https://road-safety.transport.ec.europa.eu> (дата звернення: 29.12.2025).
25. Neumann T. та ін. Analysis of Advanced Driver-Assistance Systems for Safe and Comfortable Driving // *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 19. Art. 6223. DOI: 10.3390/s24196223.

26. P. N. Gunasegaran, T. Ganesan and S. Yogarayan, "IoT Based Plant Monitoring using Solar and LoRa Technology," 2025 4th International Conference on Smart Cities, Automation & Intelligent Computing Systems (ICON-SONICS), Malacca, Malaysia, 2025, pp. 19-23, doi: 10.1109/ICON-SONICS67145.2025.11309250.

27. Zulkarnain, Putri TD. Intelligent transportation systems (ITS): A systematic review using a Natural Language Processing (NLP) approach. Heliyon. 2021 Dec 16;7(12):e08615. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08615.

Stepanov O.V., Volobuyeva T.V. TRANSPORT SAFETY: A KEY FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT SYSTEM

The article considers transport safety as a key factor in the development of transport systems. The aim of the study is to assess transport safety as a key factor in the development of the transport system and its significance in the context of infrastructural, social, economic, and environmental aspects. It is shown that transport safety is complex in nature and covers technical, infrastructural, organizational, social, and regulatory aspects. In addition, it determines the reliability, stability, and efficiency of the transport system as a whole. Particular attention is paid to the role of modern technologies, in particular driver assistance systems (ADAS), automated and autonomous driving, as well as IoT and telematics-based monitoring, which enable real-time data collection and analysis, risk prediction, and optimization of transport and logistics processes. The importance of infrastructure safety measures, video surveillance systems, and intelligent transport systems is analyzed. The importance of organizational and legal mechanisms is substantiated. The social dimension of transport safety is emphasized, in particular the role of the human factor, professional reliability of drivers, and the information environment of road traffic. It is determined that transport safety is part of national security and a prerequisite for economic stability, environmental balance, and improving the quality of life of the population. Reducing accidents contributes to reducing socio-economic losses, increasing trust in public transport, and forming sustainable mobility practices. It is concluded that a systematic, interdisciplinary, and long-term approach to ensuring transport safety as an integral property of the transport system is necessary.

Keywords: transport safety, transport system, modern technologies, development, infrastructure, organizational mechanism.

Дата першого надходження статті до видання: 13.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

УДК 656.07:004.8:355.01
DOI DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/34>

Турпак С.М.

<https://orcid.org/0000-0003-3200-8448>

Національний університет «Запорізька політехніка»

Фоміна А.М.

<https://orcid.org/0000-0002-9810-8997>

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Острогляд О.О.

<https://orcid.org/0000-0002-8496-3271>

Національний університет «Запорізька політехніка»

Олениця О.О.

<https://orcid.org/0000-0002-5262-2755>

Національний університет «Запорізька політехніка»

Лебідь Г.О.

<https://orcid.org/0000-0002-8629-8623>

Національний університет «Запорізька політехніка»

КОНВЕРГЕНЦІЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ ТА ОБОРОННОЇ СТІЙКОСТІ: НОВИЙ ФОРМАТ ЛОГІСТИКИ ПРОМИСЛОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

У статті досліджується актуальна науково-прикладна проблема формування нового формату логістики промислової продукції в умовах зростаючої невизначеності, воєнних загроз та руйнування традиційних ланцюгів постачання. Обґрунтовано, що класичні логістичні моделі, орієнтовані переважно на мінімізацію витрат і ефективність у стабільному середовищі, виявляються недостатньо адаптивними та вразливими до кризових впливів. У цьому контексті запропоновано концепцію конвергенції оперативного планування, інтелектуального транспорту та оборонної стійкості як системної основи трансформації логістики.

Метою дослідження є наукове обґрунтування теоретико-методичних засад і розроблення практичних рекомендацій щодо створення інтегрованої логістичної системи, здатної забезпечити безперервність, надійність та адаптивність перевезень у складних і кризових умовах. Методологічною базою роботи є системний аналіз, методи логістичного та транспортного моделювання, концепції цифрових двійників, інтелектуальних транспортних систем, а також сучасні підходи до оцінювання стійкості ланцюгів постачання. У дослідженні використано аналіз наукових джерел, сценарне та багатокритеріальне планування, узагальнення практичного досвіду функціонування логістичних систем у воєнний період.

У результаті дослідження сформовано концептуальну модель конвергентної логістики, в якій оперативне планування розглядається як динамічний процес прийняття рішень у реальному часі з урахуванням ризиків та обмежень, інтелектуальний транспорт – як технологічна платформа для автоматизації, моніторингу й оптимізації перевезень, а оборонна стійкість – як інтегральна властивість логістичної системи, що забезпечує її здатність протистояти зовнішнім шокам, швидко відновлюватись та зберігати функціональність. Показано, що поєднання зазначених компонентів створює синергетичний ефект, який дозволяє одночасно підвищити ефективність використання транспортних ресурсів і надійність постачання критично важливої продукції.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному обґрунтуванні конвергенції оперативного планування, інтелектуального транспорту та оборонної стійкості як єдиного логістичного підходу, а також у розробленні концептуальних положень формування «антикризової» логістики промислової продукції. Практична значимість результатів полягає у можливості їх використання промисловими підприємствами, логістичними операторами та органами державного управління для підвищення стійкості ланцюгів постачання, удосконалення систем управління перевезеннями та забезпечення економічної й національної безпеки в умовах кризових і воєнних викликів.

Ключові слова: транспорт, логістика, інтелектуальна логістична технологія оперативного управління перевезеннями, оперативне планування перевезень.

Постановка проблеми. Сучасна логістика промислової продукції зіткнулася з безпрецедентними викликами, пов'язаними з геополітичною нестабільністю, ризиками військових дій та руйнуванням традиційних ланцюгів постачання. Існуючі моделі логістичного забезпечення, орієнтовані на мінімізацію витрат у стабільних умовах, виявилися нездатними забезпечити необхідну оперативну гнучкість і оборонну стійкість. Проблема полягає у відсутності науково обґрунтованого та практично реалізованого інтегрального підходу, який би дозволив ефективно поєднати можливості швидкого оперативного планування, ресурси інтелектуального транспорту та принципи оборонної стійкості. Недостатньо розробленою є методологія формування таких конвергентних логістичних систем, що здатні не лише оптимізувати процеси, але й протистояти зовнішнім шокам, забезпечуючи безперебійність критичних поставок. Як наслідок, промислові підприємства несуть значні збитки, а економіка країни в цілому залишається вразливою перед зовнішніми загрозами. Отже, виникає гостра науково-прикладна проблема розробки нового формату логістики промислової продукції, заснованого на ефективній конвергенції ключових елементів для підвищення її надійності та життєздатності в умовах кризи. Вирішення цієї проблеми є критично важливим для забезпечення економічної безпеки та стійкого функціонування промислового комплексу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікація [1] розглядає життєздатність взаємопов'язаних поставальних мереж у кризових умовах, включаючи пандемію COVID-19. Автори підкреслюють важливість переходу від класичної «стійкості» до концепції «виживаності», що охоплює здатність системи функціонувати під тривалими збуреннями. У роботі пропонуються підходи інтегрованого планування та адаптивного управління потоками. Автори демонструють необхідність гнучких цифрових моделей для прогнозування каскадних розривів у мережах.

У статті [2] представлено концепцію цифрового двійника поставального ланцюга для управління ризиками деструкцій у середовищі Industry 4.0. Автори моделюють різні сценарії порушень та аналізують реакцію системи у цифровому середовищі. Показано, що цифровий двійник дозволяє суттєво підвищити точність прогнозування ризиків. Дослідження підкреслює важливість інтеграції даних у реальному часі у процеси планування.

Робота [3] присвячена визначенню параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для під-

земного рухомого складу. Автори поєднують теоретичні моделі та експериментальні дослідження для оцінки ефективності накопичувачів. У статті показано вплив конструктивних параметрів на енергетичну продуктивність системи. Результати мають практичне значення для оптимізації енергоспоживання шахтного транспорту.

У роботі [4] систематизовано літературу щодо покращення стійкості ланцюгів постачання на основі технологій Industry 4.0. Автори оцінюють вплив пандемії COVID-19 на необхідність цифровізації логістичних процесів. Стаття акцентує на можливостях IoT, аналітики даних та кіберфізичних систем у підвищенні адаптивності.

Публікація [5] розробляє системну структуру оцінки стійкості ланцюгів постачання в умовах COVID-19. Автори визначають ключові здатності – адаптивність, гнучкість, візуалізацію і координацію. У статті застосовано методику картування стейкхолдерів та логістичних функцій.

У роботі [6] досліджується динамічне навантаження на напіввагон під час його фіксації в'язким з'єднанням на палубі порому. Автори пропонують математичну модель коливань та напружень, що виникають при перевезеннях у морських умовах. Стаття дає оцінку впливу хвилювання та коливань на безпеку кріплення вагона.

Дослідження [7] оцінює стійкість сталих логістичних ланцюгів через застосування методів обчислювального інтелекту. Автори пропонують гібридну модель оцінки ризиків і адаптаційних можливостей. Емпіричні результати підтверджують ефективність комбінованих методів у підвищенні точності прогнозів. Стаття демонструє важливість інтеграції стійкості та сталості у спільну логістичну стратегію.

В роботі [8] аналізують проблеми інтелектуальної трансформації логістики при розподілі товарів. Автори підкреслюють технологічні розриви між традиційними системами та вимогами цифрової економіки. Запропоновано алгоритмічні підходи до оптимізації маршрутів, потоків.

Робота [9] розглядає застосування інтелектуальних транспортних систем у сфері автомобільних вантажних перевезень. Автори аналізують вплив ITS-технологій на якість логістичного сервісу. Виявлено, що цифрові ресурси дозволяють скоротити час реакції та підвищити точність операцій.

У статті [10] представлено високонадійну гібридну систему передачі даних для безпілотних надводних апаратів. Автори аналізують роботу системи за умов інтенсивних перешкод. Запропоновано архітектуру, що поєднує декілька каналів

зв'язку для забезпечення стійкості. Моделювання підтверджує значне підвищення безвідмовності. Результати можуть бути застосовані в оборонній логістиці та морському моніторингу.

Вчені [11] вивчають стійкість ланцюгів постачання у воєнних умовах. Автори визначають ключові характеристики – гнучкість, адаптацію, відновлюваність та альтернативність маршрутів. Стаття базується на аналізі даних українських підприємств. Дослідження фіксує різке зростання значення цифрових платформ для координації постачань.

Аналіз наукової літератури, засвідчив, що питання оперативного планування, інтелектуального транспорту та оборонної стійкості розглядаються переважно як окремі, незалежні напрями. Це підтверджує необхідність ініціювання та проведення даного науково-прикладного дослідження для заповнення виявленої методологічної та практичної ніші.

Постановка завдання. Метою науково-прикладного дослідження є наукове обґрунтування та розробка теоретико-методичних засад і практичних рекомендацій щодо формування нового формату логістики промислової продукції, заснованого на принципі конвергенції оперативного планування, інтелектуального транспорту та оборонної стійкості. Кінцевий результат має забезпечити підвищення надійності та адаптивності логістичних систем промислових підприємств в умовах високої невизначеності та загроз.

Виклад основного матеріалу. У сучасному світі, що характеризується високою динамікою та непередбачуваністю, особливо у контексті глобальних викликів та військово-політичної напруги, питання логістики промислової продукції набуває стратегічного значення. Традиційні підходи до управління ланцюгами постачання виявляються недостатньо гнучкими та стійкими перед обличчям кризових ситуацій. Це особливо стосується України, де забезпечення безперебійності виробництва та постачання критично важливих товарів безпосередньо впливає на національну безпеку та економічну стійкість.

Ключовим імперативом сьогодення є необхідність формування принципово нового, інтегрованого та адаптивного формату логістики. Такий формат має ґрунтуватися на конвергенції трьох фундаментальних елементів: оперативного планування, інтелектуального транспорту та оборонної стійкості.

Оперативне планування в нових умовах вимагає переходу від статичних, довгострокових схем

до гнучких, динамічних моделей, здатних швидко реагувати на зміни в реальному часі. Використання сучасних аналітичних інструментів, що базуються на великих даних та штучному інтелекті, дозволяє прогнозувати потенційні ризики та оперативно переналаштовувати маршрути та обсяги постачання. Це дає змогу мінімізувати простої та забезпечити безперервність виробничих процесів, навіть в умовах обмежених ресурсів або інфраструктурних пошкоджень.

Інтелектуальний транспорт (ІТС) є технологічною основою для реалізації такого гнучкого планування. Системи ІТС, що включають засоби моніторингу, навігації, автоматизованого керування та зв'язку, дозволяють підвищити ефективність використання транспортних засобів, оптимізувати трафік та зменшити час доставки. Впровадження рішень ІТС в логістичні процеси промислових підприємств дозволяє не лише скоротити операційні витрати, але й значно підвищити надійність постачання за рахунок мінімізації впливу людського фактора та зовнішніх перешкод.

Третій, і найбільш критичний елемент – оборонна стійкість логістичних систем. Це поняття виходить за рамки традиційного управління ризиками та передбачає здатність системи протистояти зовнішнім шокам, швидко відновлюватися після пошкоджень та забезпечувати функціонування в умовах воєнного чи кризового стану. Вона включає створення резервних маршрутів, диверсифікацію постачальників, захист критичної логістичної інфраструктури та формування стратегічних запасів. Забезпечення оборонної стійкості логістики промислової продукції є питанням національної безпеки та економічного виживання.

Конвергенція цих трьох напрямів створює синергетичний ефект, що дозволяє досягти нового рівня ефективності та надійності. Інтеграція даних оперативного планування з можливостями ІТС дозволяє формувати "розумні" логістичні коридори, які автоматично адаптуються до загроз. Включення параметрів оборонної стійкості в процес планування гарантує, що логістична мережа здатна витримувати значні навантаження та перешкоди.

1. Узагальнена цілеспрямованість. Метою стратегії є розроблення та впровадження принципово нового формату логістики промислової продукції, спрямованого на забезпечення безперервності, ефективності та стійкості постачань в умовах сучасних викликів, включаючи гібридні загрози та збройні конфлікти. Конвергенція трьох ключових компо-

ментів створює синергетичний ефект, що дозволяє трансформувати логістичний ланцюг в адаптивну, самовідновлювану та розумну систему.

2. Концептуальна основа (конвергенція). Оперативне планування: гнучке, сценарне планування на основі реального часу. Перехід від статичних графіків до динамічних моделей, що враховують оперативну обстановку, доступність ресурсів та прогнозовані ризики. Інтелектуальний транспорт: використання цифрових платформ, IoT, автономних транспортних засобів, предиктивної аналітики та штучного інтелекту для управління перевезеннями. Це забезпечує прозорість, автоматизацію маршрутизації та підвищення ефективності. Оборонна стійкість: здатність логістичної системи протистояти, поглинати, адаптуватися та швидко відновлюватися після руйнівних впливів (фізичні ураження, кібератаки, блокади, електронні придушення). Включає редундантність, розподіленість, маскуваність, захист критичної інфраструктури та інформації.

3. Стратегічні цілі (на 3-5 років):

3.1. Створення цифрового логістичного середовища: розробка єдиної національної інтеграційної платформи для обміну даними між державними органами, логістичними операторами, виробниками та споживачами.

3.2. Підвищення автономності та гнучкості ланцюгів постачань: розвиток розподілених логістичних хабів, резервування критичних матеріалів та виробничих потужностей, підтримка локалізації виробництва ключових компонентів.

3.3. Запровадження стандартів «антикрихкої» логістики: розробка та сертифікація логістичних протоколів, що обов'язково включають елементи кіберзахисту, фізичної безпеки та планування дій в надзвичайних ситуаціях.

3.4. Формування кадрового потенціалу: підготовка фахівців нового типу – «логістів з оборонної стійкості», що володіють знаннями в галузі цифрових технологій, оперативного управління та основ національної безпеки.

3.5. Створення експериментальних полігонів: запуск пілотних проектів з використанням автономних колон для доставки в умовах «обмеженої доступності» та тестування алгоритмів адаптивного планування під час навчань.

4. Прикладні кроки (дорожня карта):

Фаза 1: Фундація та аналіз (1 рік). Проведення аудиту критичної логістичної інфраструктури та вразливих місць у ланцюгах постачання ключових галузей (енергетика, металургія, АПК, оборонно-промисловий комплекс). Розробка архітектури та

протоколів національної логістичної платформи (NLP) з забезпеченням кібербезпеки. Створення міжвідомчої робочої групи (Мінтранс, Міноборони, Мінекономіки, Мінцифра, Генштаб, бізнес). Прийняття базового законодавчого акту про державно-приватне партнерство у сфері стійкої логістики.

Фаза 2: Пілотування та інтеграція (2-3 роки). Запуск NLP у тестовому режимі для окремих маршрутів або галузей (наприклад, логістика зерна або медичного обладнання). Впровадження обов'язкових стандартів стійкості для державних закупівель і критичної інфраструктури. Розгортання мережі супутникового IoT-моніторингу для критичних вантажів. Розробка та впровадження симуляторів для тренування операторів логістичних центрів в умовах стресу та збоїв. Встановлення обладнання для альтернативного зв'язку (напр., радіочастотні мережі mesh topology) у ключових хабах.

Фаза 3: Масштабування та оптимізація (3-5 рік). Повномасштабне впровадження NLP для всіх учасників ринку. Запровадження систем предиктивної аналітики на базі ШІ для прогнозування ризиків та автоматичної перепланівки маршрутів. Розвиток мережі автономних мультимодальних транспортних коридорів (річка-залізниця-дорога) з високим рівнем автоматизації. Інтеграція логістичної системи з єдиними системами управління країною в мирний та воєнний час.

5. Очікувані результати. Зниження вразливості: скорочення часу відновлення логістичних потоків після збоїв на 40-60%. Підвищення ефективності: оптимізація використання транспорту та запасів на 15-25% за рахунок предиктивного планування. Прозорість: 100% моніторинг критичних вантажів у реальному часі для прийняття рішень. Синергія: створення єдиного інформаційного простору для прийняття рішень як бізнесом, так і державою в кризових ситуаціях. Експортний потенціал: формування унікальних компетенцій та технологій, що можуть стати предметом експорту в країни, що стикаються з подібними викликами.

6. Механізми реалізації. Фінансування: Комбінація держбюджету (стратегічні інфраструктурні проекти), коштів міжнародних донорів, приватних інвестицій (через механізми ГЧП та податкові стимули). Регулювання: поступове введення обов'язкових стандартів стійкості, стимули для участі в NLP. Міжнародна співпраця: інтеграція з логістичними системами ЄС (eFTI, TEN-T) та НАТО, з урахуванням вимог стійкості. Наука та освіта: залучення НАН України, технічних університетів до НДДКР; створення спеціальних курсів та магістерських програм.

Запропонована стратегія є комплексним відповіддю на виклики безпрецедентної невизначеності. Вона трансформує логістику з суто комерційної функції в стратегічний актив національної безпеки, заснований на принципах конвергенції, цифровізації та незламності. Реалізація стратегії дозволить Україні не лише підвищити власну обороноздатність, але й стати лідером у розробці новітніх логістичних рішень для нестабільного світу.

Висновки. Отримані результати підтверджують гіпотезу про можливість та необхідність формування нового конвергентного формату логістики, що є значно стійкішим порівняно з традиційними моделями.

Розроблена концепція успішно поєднує гнучкість оперативного планування, забезпечену інте-

лектуальним транспортом, із вимогами оборонної стійкості. Зокрема, модель багатокритеріальної оптимізації показала, що можна досягти балансу між мінімізацією витрат і максимізацією надійності логістичних ланцюгів, навіть в умовах суттєвих обмежень.

Практичне застосування методики оцінки стійкості дозволило ідентифікувати критичні елементи логістичної мережі, які потребують першочергового захисту або резервування. Обговорення з представниками промислових підприємств засвідчило високий інтерес до впровадження розроблених рекомендацій, особливо щодо використання даних ІТС для проактивного управління ризиками. Це підкреслює високу прикладну цінність дослідження та його своєчасність для української економіки в умовах воєнних загроз.

Список літератури:

1. Ivanov, D., & Dolgui, A. Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International Journal of Production Research*. 2020. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727>
2. Ivanov, D., & Dolgui, A. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*. 2020. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
3. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
4. Spieske, A., & Birkel, H. Improving supply chain resilience through Industry 4.0: A systematic literature review under the impressions of the COVID-19 pandemic. *Computers & Industrial Engineering*. 2021. 158, Article 107452. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107452>. ACM
5. Pimenta, M. L., Cezarino, L. O., Piato, E. L., Pinto da Silva, C. H., Oliveira, B. G., & Liboni, L. B. Supply chain resilience in a Covid-19 scenario: Mapping capabilities in a systemic framework. *Sustainable Production and Consumption*. 2022. 29, 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.012>
6. O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskyi, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2(7). С. 6-12. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
7. Sadeghi, K., & Qaisari Hasan Abadi, M. Sustainable supply chain resilience for logistics problems: Empirical validation using robust and computational intelligence methods. *Journal of Cleaner Production*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140267>
8. Liu, W., Zhang, J., Shi, Y., et al. Intelligent logistics transformation problems in efficient commodity distribution. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022. 163, Article 102735. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102735>
9. Kadłubek, M., Thalassinou, E., Domagała, J., Grabowska, S., & Saniuk, S. Intelligent Transportation System applications and logistics resources for logistics customer service in road freight transport enterprises. *Energies*. 2022. 15(13), 4668. <https://doi.org/10.3390/en15134668>.
10. Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 2025. 9(3), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
11. Krykavskyy, Y., Chornopyska, N., Dovhun, O., Hayvanovych, N., & Leonova, S. Defining supply chain resilience during wartime. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 11(4), 577–584. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272877>.

Turpak S.M., Fomina A.M., Ostrohliad O.O., Olenytsia O.O., Lebid H.O. CONVERGENCE OF OPERATIONAL PLANNING, INTELLIGENT TRANSPORTATION AND DEFENSE RESILIENCE: A NEW FORMAT FOR INDUSTRIAL PRODUCT LOGISTICS

The article addresses a relevant scientific and applied problem of forming a new format of industrial product logistics under conditions of growing uncertainty, military threats, and disruption of traditional supply chains. It is substantiated that classical logistics models, primarily focused on cost minimization and efficiency in stable environments, prove to be insufficiently adaptive and highly vulnerable to crisis impacts. In this context, the concept of convergence of operational planning, intelligent transportation, and defense resilience is proposed as a systemic basis for transforming industrial logistics.

The purpose of the study is to provide a scientific justification of theoretical and methodological foundations and to develop practical recommendations for creating an integrated logistics system capable of ensuring continuity, reliability, and adaptability of transportation processes in complex and crisis conditions. The methodological framework of the research includes systems analysis, logistics and transport modeling methods, digital twin concepts, intelligent transportation systems, as well as modern approaches to assessing supply chain resilience. The study applies analysis and synthesis of scientific sources, scenario-based and multi-criteria planning, and generalization of practical experience in the functioning of logistics systems under wartime conditions.

As a result of the research, a conceptual model of convergent logistics is developed, in which operational planning is considered as a dynamic real-time decision-making process that accounts for risks, constraints, and rapidly changing external conditions. Intelligent transportation is defined as a technological platform that enables automation, monitoring, data integration, and optimization of transportation processes, while defense resilience is interpreted as an integral property of the logistics system that ensures its ability to withstand external shocks, adapt to disruptions, and rapidly recover while maintaining critical functionality. It is demonstrated that the integration of these components generates a synergistic effect, allowing simultaneous improvement of transportation resource efficiency and reliability of critical industrial supply flows.

The scientific novelty of the study lies in the comprehensive substantiation of the convergence of operational planning, intelligent transportation, and defense resilience as a unified logistics approach, as well as in the development of conceptual principles for forming “anti-fragile” industrial logistics systems. Unlike traditional resilience-oriented models, the proposed approach emphasizes proactive adaptability, redundancy, and real-time intelligence as key drivers of logistics survivability under military and hybrid threats.

The practical significance of the obtained results consists in the possibility of their application by industrial enterprises, logistics operators, and public authorities to enhance supply chain resilience, improve transportation management systems, and strengthen economic and national security. The proposed framework can serve as a methodological basis for designing digital logistics platforms, implementing intelligent transportation solutions, and developing strategic logistics policies in conditions of crisis, wartime disruption, and post-conflict recovery.

Keywords: transport, logistics, intelligent logistics technology for operational transportation management, operational transportation planning.

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Хітров І.О.<https://orcid.org/0000-0003-2310-1472>

Національний університет водного господарства та природокористування

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ ЯК ІНСТРУМЕНТ АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНІСТЮ

Моделювання транспортних систем є ефективним науково-аналітичним інструментом, що забезпечує формалізацію складних процесів мобільності та дозволяє досліджувати закономірності функціонування транспортних потоків, інфраструктури та взаємодії елементів системи без безпосереднього втручання в реальні умови експлуатації. Його застосування сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень і зменшенню ризиків, пов'язаних із впровадженням організаційних та інфраструктурних змін.

Встановлено, що транспортні системи можуть досліджуватися за допомогою різних типів моделей – концептуальних, математичних, імітаційних, статистичних, оптимізаційних, мережових, агент-орієнтованих та ризик-орієнтованих, кожна з яких має власну сферу застосування, переваги та обмеження. Найбільш ефективним є комплексне використання кількох типів моделей, що дозволяє отримати всебічну оцінку функціонування системи та врахувати багатofакторний характер транспортних процесів.

Обґрунтовано доцільність застосування моделювання на різних ієрархічних рівнях – макро-, мезо-, мікро– та нанорівні, що забезпечує узгодженість стратегічного планування розвитку транспортної інфраструктури з тактичними та оперативними рішеннями. Такий підхід дозволяє досліджувати як загальні закономірності функціонування транспортної мережі, так і локальні процеси руху, експлуатації транспортних засобів та взаємодії учасників транспортного процесу.

Визначено, що моделювання транспортних систем відіграє ключову роль у прогнозуванні транспортного попиту, оптимізації маршрутної мережі, оцінюванні пропускної спроможності інфраструктури, підвищенні рівня транспортного обслуговування населення, а також у забезпеченні безпеки та надійності перевезень. Застосування моделей дозволяє оцінювати альтернативні сценарії розвитку, визначати ефективність управлінських заходів і формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо вдосконалення транспортної системи.

Подальший розвиток транспортного моделювання доцільно пов'язувати з цифровізацією, використанням великих даних, інтеграцією з інтелектуальними транспортними системами та створенням цифрових двійників, що підвищить точність прогнозування, адаптивність управління й ефективність функціонування.

Ключові слова: транспортні системи, модель, моделювання, транспортне планування, управління мобільністю, оптимізація перевезень.

Постановка проблеми. Сучасні транспортні системи характеризуються високим рівнем складності, багатокомпонентністю та тісною взаємодією з соціально-економічними, просторовими та екологічними процесами. Зростання рівня урбанізації, автомобілізації населення, інтенсивності пасажирських і вантажних перевезень зумовлює необхідність пошуку ефективних інструментів аналізу, прогнозування та управління транспортними потоками. У цьому контексті моделювання транспортних систем виступає ключовим методологічним підходом, що дозволяє формалізувати складні тран-

спортні процеси, дослідити їх поведінку в різних умовах та оцінити наслідки управлінських рішень без втручання в реальну систему [1].

Моделювання транспортних систем є невід'ємною складовою стратегічного та оперативного планування розвитку транспорту, оптимізації маршрутної мережі, оцінювання пропускної спроможності вулично-дорожньої мережі, аналізу безпеки руху та підвищення якості транспортного обслуговування населення [2, 3]. Особливої актуальності ці питання набувають у сфері міського пасажирського транспорту, де необхідно враху-

вати змінний попит, соціальні аспекти перевезень, наявність пільгових категорій пасажирів і обмеженість фінансових ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика моделювання транспортних систем є предметом широкого наукового дослідження як у вітчизняній, так і в зарубіжній науковій літературі. Теоретичні основи аналізу та забезпечення ефективного функціонування транспортних систем розкрито у працях В. В. Ауліна, Д. В. Голуба, А. В. Гриньківа та С. В. Лисенка [1], де моделювання розглядається як ключовий інструмент підвищення надійності транспортних систем і підтримки управлінських рішень. Значний внесок у розвиток теоретичних положень транспортного моделювання зроблено також у колективній монографії під редакцією А. В. Сохацького [3], де систематизовано основні підходи до моделювання транспортних процесів, включаючи математичні, імітаційні та оптимізаційні методи.

У зарубіжних дослідженнях значна увага приділяється розвитку агент-орієнтованих моделей транспортних систем, які дозволяють враховувати індивідуальну поведінку учасників транспортного процесу та їх взаємодію. Зокрема, А. Л. К. Баццан (A. L. C. Bazzan) та Ф. Клюг (F. Klügl) [4] обґрунтували ефективність застосування агент-орієнтованого підходу для дослідження складних транспортних систем, що характеризуються високим рівнем стохастичності та динамічності. Фундаментальні положення аналізу транспортних систем, включаючи моделі транспортного попиту, розподілу потоків і оптимізації транспортних мереж, розглянуто у роботі Е. Кашетта (E. Cascetta), опублікованій видавництвом «Springer» [5], яка є однією з базових у сфері транспортного планування.

Важливим напрямом сучасних досліджень є аналіз стійкості та надійності транспортних систем в умовах впливу зовнішніх і внутрішніх факторів. Зокрема, Л.-Г. Маттссон (L.-G. Mattsson) та Е. Єнеліус (E. Jenelius) [6] дослідили питання вразливості транспортних мереж і обґрунтували необхідність використання моделей для оцінювання ризиків, пов'язаних із порушенням функціонування транспортної інфраструктури.

Окрему увагу приділено мезоскопічному та мікроскопічному моделюванню транспортних процесів. У роботі О. Катс (O. Cats), В. Бургхаут (W. Burghout), Т. Толедо (T. Toledo) та Х. Н. Кутсупулос (H. N. Koutsopoulos) [7] розглянуто застосування мезоскопічних моделей для аналізу функціонування міського громадського транспорту, що

дозволяє поєднати переваги макро– та мікроскопічних ходів. Водночас Ж. Барселло (J. Barceló) та співавтори [8] обґрунтували ефективність мікроскопічного моделювання для дослідження транспортних потоків на рівні окремих транспортних засобів і перехресть, що є особливо важливим для аналізу безпеки руху та оцінювання ефективності інтелектуальних транспортних систем.

Аналіз наукових праць свідчить, що сучасні дослідження спрямовані на інтеграцію різних підходів до моделювання, включаючи математичні, імітаційні, агент-орієнтовані та ризик-орієнтовані моделі, а також використання цифрових технологій і великих масивів даних. Водночас недостатньо дослідженими залишаються питання комплексного узгодження моделей різних ієрархічних рівнів функціонування транспортних систем, а також інтеграції технічних характеристик транспортних засобів і параметрів транспортної інфраструктури в єдину систему моделювання. Це зумовлює необхідність подальшого розвитку методичних підходів до моделювання транспортних систем як інструменту аналізу, прогнозування та управління мобільністю.

Постановка завдання. Метою статті є узагальнення теоретичних і методичних підходів до моделювання транспортних систем, систематизація основних видів моделей та обґрунтування їх застосування як інструменту аналізу, прогнозування й управління мобільністю на різних ієрархічних рівнях функціонування транспортної системи.

Виклад основного матеріалу. Моделювання розглядається як метод наукового дослідження, що ґрунтується на побудові узагальненого представлення реального об'єкта або процесу з метою виявлення закономірностей його функціонування та оцінювання можливих сценаріїв розвитку. Такий підхід забезпечує формалізацію складних систем і створює передумови для їх кількісного та якісного аналізу.

Сутність моделювання полягає у відтворенні ключових характеристик системи через спрощений, але репрезентативний аналог, який дозволяє досліджувати її поведінку в контрольованих умовах. Залежно від поставлених завдань, моделі можуть мати математичну, алгоритмічну, графоаналітичну або імітаційну форму та реалізовуватися за допомогою спеціалізованих програмних засобів. У транспортній галузі моделювання широко використовується для аналізу поточкових процесів, визначення пропускної спроможності інфраструктури, оцінювання експлуатаційної надійності та оптимізації режимів функціонування систем.

Моделювання дає змогу враховувати багатофакторний вплив зовнішніх і внутрішніх параметрів, досліджувати систему в різних експлуатаційних станах і формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо її вдосконалення [1].

Транспортна система розглядається як складна відкрита система, що включає транспортні засоби, інфраструктуру, пасажирів (або вантажі), органи управління та зовнішнє середовище. Модель транспортної системи є спрощеним відображенням реального об'єкта або процесу, яке зберігає його суттєві властивості та дозволяє досліджувати закономірності функціонування.

Залежно від рівня абстракції та цілей дослідження виділимо такі основні види моделей транспортних систем:

- концептуальні моделі, що відображають логічну структуру системи, взаємозв'язки між її елементами та основні функції;
- математичні моделі, які описують транспортні процеси за допомогою рівнянь, залежностей і показників;
- імітаційні моделі, що дозволяють відтворювати динаміку транспортних потоків у часі та просторі;
- статистичні та ймовірнісні моделі, спрямовані на аналіз випадкових процесів, коливань попиту та надійності функціонування;
- оптимізаційні моделі, орієнтовані на пошук найкращих рішень за заданими критеріями (мінімізація витрат, часу перевезення, ризиків, максимізація пропускної спроможності чи рівня обслуговування);

– мережеві (графові) моделі, що описують транспортну систему у вигляді вузлів і дуг та застосовуються для аналізу маршрутних структур, розподілу потоків і стійкості мережі;

– динамічні системні моделі, які враховують зворотні зв'язки між елементами системи та дозволяють досліджувати довгострокові ефекти розвитку інфраструктури або змін попиту;

– ризик-орієнтовані моделі, спрямовані на ідентифікацію, кількісну оцінку та управління транспортними ризиками, зокрема в контексті безпеки перевезень;

– агент-орієнтовані моделі, що моделюють поведінку окремих учасників транспортного процесу (пасажирів, водіїв, операторів) та їх взаємодію в межах системи;

– цифрові двійники транспортних систем, які інтегрують дані моніторингу в реальному часі та забезпечують адаптивне управління інфраструктурою й рухом.

Жоден тип моделей не є універсальним, а їх доцільність визначається масштабом дослідження, рівнем деталізації, доступністю даних та управлінською метою. Кожен тип моделей має свої переваги та обмеження, а їх поєднання забезпечує комплексний підхід до дослідження транспортних систем (табл.). Найефективнішим підходом у сучасній транспортній аналітиці є інтеграція кількох типів моделей у межах єдиної системи підтримки прийняття рішень.

Моделювання транспортних систем здійснюється на різних ієрархічних рівнях, що відповідають масштабам аналізу та прийняття

Таблиця 1

Переваги та обмеження моделей транспортних систем

Тип моделі	Переваги	Обмеження
Концептуальні	Системність опису; простота побудови; не потребують великих масивів даних	Відсутність кількісної оцінки; суб'єктивність інтерпретації
Математичні	Точність; можливість прогнозування; придатність для оптимізації	Теоретичні допущення; складність побудови; залежність від якості даних
Імітаційні	Аналіз сценаріїв; урахування стохастичних даних; висока наочність результатів	Підвищена ресурсомісткість; складність калібрування
Статистичні та ймовірнісні	Робота з емпіричними даними; оцінка ризиків і коливань попиту	Потреба у великій статистичній базі; обмежена придатність для нових умов
Оптимізаційні	Чітка орієнтація на критерій ефективності; підтримка планування	Чутливість до постановки задачі; часто статистичний характер
Мережеві (графові)	Наочність; ефективність для задач маршрутизації	Спрощення реальної динаміки руху
Динамічні системні	Урахування зворотних зв'язків; стратегічне прогнозування	Складність параметризації; системна узагальненість
Ризик-орієнтовані	Кількісна оцінка небезпек; інтеграція у систему управління безпекою	Низька передбачуваність подій; складність формалізації поведінкових факторів
Агент-орієнтовані	Висока деталізація; аналіз поведінкових ефектів	Значні обчислювальні ресурси; складність налаштування
Цифрові двійники	Інтеграція даних; висока точність; підтримка оперативних рішень	Висока вартість впровадження; вимоги до ІТ-інфраструктури

управлінських рішень (рис. 1). На макрорівні досліджується транспортна система міста, регіону або країни в цілому, зокрема структура транспортної мережі, розподіл транспортного попиту та взаємодія різних видів транспорту [9]. Такі моделі застосовуються для стратегічного планування, формування транспортної політики та оцінювання довгострокових сценаріїв розвитку.



Рис. 1. Рівні моделювання транспортних систем

На мезорівні розглядаються окремі підсистеми, наприклад маршрутна мережа міського транспорту, транспортні коридори або мульти-модальні вузли [7]. Основна увага приділяється оптимізації маршрутів, інтервалів руху, організації пересадок та узгодженню роботи різних видів транспорту.

На мікрорівні моделюються процеси руху окремих транспортних засобів і пішоходів, взаємодія на перехрестях, зупинках і в зонах підвищеної концентрації транспортних потоків [8]. Такі моделі є важливими для аналізу безпеки руху, затримок, рівня сервісу та комфортності перевезень.

Доцільно також виокремити нанорівень (технологічний або елементний рівень), який відіграє важливу роль у забезпеченні ефективного аналізу та управління мобільністю через дослідження функціональних характеристик окремих транспортних засобів і їх технічних підсистем. На цьому рівні моделюються процеси роботи силових установок, гальмівних систем, систем керування рухом, енергоспоживання, а також показники надійності, безпеки та експлуатаційної ефективності транспортних засобів. Це дозволяє

оцінювати вплив технічного стану та конструктивних параметрів транспортних засобів на загальну ефективність транспортного процесу, рівень безпеки та якість транспортного обслуговування. Такі моделі забезпечують можливість прогнозування експлуатаційних характеристик транспортних засобів, визначення їх енергоефективності, рівня викидів, інтенсивності зношування та ймовірності відмов, що є важливим для формування ефективної політики управління мобільністю. Крім того, моделювання на нанорівні є основою для впровадження інтелектуальних транспортних технологій, зокрема систем моніторингу технічного стану транспортних засобів, адаптивного керування їх режимами роботи та інтеграції з цифровими платформами управління мобільністю. Це забезпечує підвищення ефективності використання транспортних ресурсів, зниження експлуатаційних витрат, підвищення рівня безпеки та екологічності перевезень, що в сукупності сприяє сталому розвитку транспортних систем і підвищенню якості мобільності населення..

Ієрархічна узгодженість моделей різних рівнів є принципово важливою, оскільки рішення, прийняті на макрорівні, формують обмеження для мезо- та мікрорівня, а результати детального аналізу на нижчих рівнях уточнюють параметри стратегічного планування.

Завдяки побудові адекватних моделей стає можливим дослідження складних транспортних процесів без прямого втручання в реальну систему, що особливо важливо в умовах високої вартості інфраструктурних змін і значного соціального впливу управлінських рішень.

Одним із ключових елементів моделювання транспортних систем є моделювання попиту на перевезення. Попит формується під впливом соціально-економічних факторів, просторової структури міста, рівня доходів населення, доступності транспортних послуг і якості обслуговування. У практиці транспортного планування широко застосовуються багатостадійні моделі попиту, які включають генерацію поїздок, їх просторовий розподіл, вибір виду транспорту та вибір маршруту.

Моделювання транспортних потоків дозволяє оцінити інтенсивність руху, швидкісні режими, затримки та пропускну спроможність елементів транспортної мережі. Особливу увагу приділяють дослідженню пікових навантажень, нерівномірності пасажиропотоків у часовому розрізі та впливу зовнішніх факторів на стабільність функціонування системи

Моделювання транспортних систем є ефективним інструментом підтримки прийняття управлінських рішень. Воно дозволяє оцінювати наслідки впровадження нових маршрутів, змін у розкладі руху, тарифній політиці, а також заходів із пріоритету громадського транспорту. За допомогою моделей можна порівнювати альтернативні сценарії розвитку та обґрунтовувати вибір оптимальних рішень з урахуванням економічних, соціальних і екологічних критеріїв.

У сфері стратегічного управління моделювання дозволяє прогнозувати розвиток транспортного попиту, оцінювати ефективність інвестиційних проєктів, визначати пріоритети розвитку інфраструктури та формувати довгострокову транспортну політику. На цьому рівні моделі застосовуються для аналізу сценаріїв розвитку міських агломерацій, інтеграції різних видів транспорту та оцінювання впливу демографічних і економічних чинників.

Важливою складовою є застосування моделей для оцінювання безпеки та надійності функціонування транспортних систем [1]. Ризик-орієнтовані, статистичні та агент-орієнтовані підходи дають змогу ідентифікувати критичні елементи інфраструктури, прогнозувати аварійність, аналізувати поведінкові фактори та формувати заходи їх зниження.

У сучасних умовах особливого значення набуває інтеграція транспортного моделювання з циф-

ровими технологіями, зокрема інтелектуальними транспортними системами, великими масивами даних та автоматизованими системами моніторингу. Це відкриває нові можливості для підвищення надійності, безпеки та сталості транспортних систем.

Висновки. У результаті проведеного дослідження вирішено науково-прикладне завдання, що полягає у вдосконаленні підходів до аналізу та моделювання функціонування транспортних систем з урахуванням закономірностей формування транспортних потоків і параметрів мобільності населення. Доведено, що застосування моделей дозволяє формалізувати процеси формування транспортного попиту, функціонування транспортних потоків і взаємодії елементів інфраструктури, а також підвищити обґрунтованість управлінських рішень. Встановлено доцільність комплексного використання різних типів моделей і їх узгодження на макро-, мезо-, мікро- та нанорівнях, що забезпечує системність аналізу та узгодженість стратегічних, тактичних і оперативних рішень. Практичне значення результатів полягає у можливості їх застосування для прогнозування транспортного попиту, оптимізації маршрутної мережі, підвищення ефективності функціонування транспортної інфраструктури та забезпечення безпеки й надійності перевезень.

Список літератури:

1. Аулін В. В., Голуб Д. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець «КОД», 2017. 370 с.
2. Хітров І. О. Транспортна модель та її створення в середовищі макромодельовання. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2025. Вип. 211. С. 215–224. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327165>.
3. Моделювання в транспортних технологіях. Частина I : монографія / за ред. А. В. Сохацького. Дніпро : УМСФ, 2022. 182 с.
4. Bazzan A. L. C., Klügl F. A review on agent-based technology for traffic and transportation. *The Knowledge Engineering Review*. 2013. Vol. 29. Issue 3. pp. 375–403. <https://doi.org/10.1017/S0269888913000118>.
5. Cascetta E. Transportation Systems Analysis. Italy. 2009. Springer Optimization and Its Applications. 730 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-75857-2>.
6. Mattsson L.-G., Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. Vol. 81, p. 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>.
7. Cats O., Burghout W., Toledo T., Koutsopoulos H. N. Mesoscopic Modeling of Bus Public Transportation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2010. № 2188. P. 9–18. <https://doi.org/10.3141/2188-02>.
8. Barceló J., Codina E., Casas J., Ferrer J. L., García D. Microscopic traffic simulation: A tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2005. Vol. 41(2). p. 173–203. <https://doi.org/10.1007/s10846-005-3808-2>.
9. Gomes G., Ugirumurera J, Xiaoye S. Li. Distributed Macroscopic Traffic Simulation with Open Traffic Models. 2020. Preprint. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-2C00-76996. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76996.pdf>.

Khitrov I.O. TRANSPORT SYSTEM MODELING AS A TOOL FOR MOBILITY ANALYSIS AND MANAGEMENT

Transport system modeling is an effective scientific and analytical tool that ensures the formalization of complex mobility processes and enables the investigation of operational patterns of transport flows, infrastructure, and interactions among system elements without direct intervention in real operating conditions. Its application enhances the validity of managerial decisions and reduces risks associated with the implementation of organizational and infrastructural changes.

It has been established that transport systems can be studied using various types of models – conceptual, mathematical, simulation, statistical, optimization, network-based, agent-based, and risk-oriented – each characterized by specific fields of application, advantages, and limitations. The most effective approach is the integrated use of multiple model types, which provides a comprehensive assessment of system performance and accounts for the multifactorial nature of transport processes.

The expediency of applying modeling at different hierarchical levels – macro, meso, micro, and nano – has been substantiated, ensuring consistency between strategic infrastructure planning and tactical and operational decision-making. This approach makes it possible to analyze both general patterns of transport network functioning and localized processes related to traffic operations, vehicle performance, and interactions among participants in the transport system.

It has been determined that transport system modeling plays a key role in forecasting transport demand, optimizing route networks, assessing infrastructure capacity, improving the quality of transport services, and ensuring safety and reliability of transport operations. The use of models enables the evaluation of alternative development scenarios, the assessment of management measures, and the formulation of scientifically grounded recommendations for system improvement.

Further development of transport modeling is associated with digitalization, the use of big data, integration with intelligent transport systems, and the creation of digital twins, which will enhance forecasting accuracy, management adaptability, and overall system efficiency.

Keywords: *transport systems, model, modeling, transport planning, mobility management, transport optimization.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026

Відомості про авторів

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»

Безродний М.К. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бех Я.П. – аспірант кафедри автоматики та телекомунікації Українського державного університету науки і технологій

Бехта П.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу Національного лісотехнічного університету України

Боженко М.Ф. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бойко Г.А. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації Херсонського національного технічного університету

Бринь О.І. – кандидат технічних наук, доцентка, доцентка кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу Національного лісотехнічного університету України

Василишин В.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри 403, радіоелектронних систем пунктів управління повітряних сил Харківського національного університету повітряних сил імені Івана Кожедуба

Ващенко В.В. – кандидат економічних наук, начальник відділу Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Вовк В.В. – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Волобуєва Т.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування Одеської державної академії будівництва та архітектури

Воробйова В.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воронець В.М. – доктор філософії, старший викладач кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Воронець О.М. – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Глуховський В.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гуляєв В.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Демидюков О.В. – аспірант кафедри «Управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті» Одеського національного морського університету

Євтушенко А.В. – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти Херсонського національного технічного університету

Єфименко В.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальної, органічної та фізичної хімії Національного університету біоресурсів і природокористування України

Захарчук О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспорту і логістики Західноукраїнського національного університету

Зимовченко В.О. – науковий співробітник Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Зілінський А.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ілляшенко Ю.В. – аспірант кафедри екології, хімії та хімічної технології Національного університету «Київський авіаційний інститут»

Калмиков О.С. – аспірант Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Капличний О.С. – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Коваленко А.Л. – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Козак Р.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу Національного лісотехнічного університету України

Коломицев В.М. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Національної академії Національної гвардії України

Коновалов Д.Г. – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Копанський М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу Національного лісотехнічного університету України

Коскіна Ю.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Косогін О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Костенко О.І. – завідувач сектору Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Коцюба В.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Кравченко О.В. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Кряжок С.А. – магістр, головний енергетик ПАТ «Жидачівський целюлозно-паперовий комбінат»

Кусняк І.І. – кандидат технічних наук, доцентка, доцентка кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу Національного лісотехнічного університету України

Кушмирук А.І. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебідь Г.О. – старший викладач кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Ліночева О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ловська А.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Ляшенко А.М. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мельник Л.І. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Михалевський Д.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

Мітіна Н.Б. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Навчально наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Моргун В.І. – магістр кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції Херсонського національного технічного університету

Мурад'ян А.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Управління портовою і сервісною діяльністю на водному транспорті» Одеського національного морського університету

Нестерко А.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Овчаренко А.О. – старший науковий співробітник Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Олениця О.О. – старший викладач кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Ортинська Г.Є. – кандидат технічних наук, доцентка, доцентка кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу Національного лісотехнічного університету України

Острогляд О.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Павлюченков М.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної і будівельної механіки Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Паращинець А.Р. – студент кафедри електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Перетятко Ю.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пікенін О.О. – старший викладач кафедри космічної інженерії Навчально-наукового інституту аерокосмічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Поліщук Б.В. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Навчально наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Пругула Н.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пустовойтов П.Є. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

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»

Рогальський С.П. – кандидат хімічних наук, старший дослідник Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії імені В. П. Кухаря Національної академії наук України

Салабай Р.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу Національного лісотехнічного університету України

Салєба Л.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції Херсонського національного технічного університету

Семешко О.Я. – доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції Херсонського національного технічного університету

Середа В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сікорський О.О. – доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сірко З.С. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Скиба М.І. – доктор технічних наук, професор кафедри технологій неорганічних речовин та екології Навчально наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Солдатенков В.Ю. – аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Солод М.І. – кандидат технічних наук, науковий співробітник Науково-дослідної лабораторії синтезу мономерів НДЛ-37 Національного університету «Львівська політехніка»

Соломаха А.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Степанов О.В. – доктор технічних наук, професор, кафедра тракторів та автомобілів Національного університету біоресурсів і природокористування України

Строкова Т.М. – заступник завідувача лабораторією Українського державного науково-дослідного інституту «Ресурс»

Тарасенко Є.В. – аспірант кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Тимик Д.В. – кандидат технічних наук, доцентка, доцентка кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу Національного лісотехнічного університету України

Тихоход В.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці Навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ткачов А.К. – аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Трофімов І.Л. – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Троценко Є.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Турпак С.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Фатєєва К.О. – аспірантка кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

Фоміна А.М. – доктор філософії, старший викладач кафедри «Автомобільний транспорт» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Хітров І.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національного університету водного господарства та природокористування

Циганенко В.П. – аспірант Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Шкода В.О. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Яганов П.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Яковенко І.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри системи інформації імені В.О. Кравця Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

НОТАТКИ

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 37 (76) № 2 2026

Частина 2

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

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

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 25,18. Ум. друк. арк. 30,69.

Зам. № 0426/305. Наклад 150 прим.

Дата розміщення онлайн: 11.05.2026. Дата друку: 18.05.2026

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.