

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКИ

Серія: Технічні науки

№ 7, 2026



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Засновник – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1875 від 30.05.2024 року. Ідентифікатор медіа – R30-05214

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», (вул. Південне шосе, буд. 80, м. Запоріжжя, 69008, mir@metinvestholding.com, тел. (067) 76-04-954).

Друкується за рішенням Вченої ради ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» (протокол № 8 від 29.05.2026)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Грибков Е. П. (головний редактор) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургії та інноваційних технологій, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Кухар В. В. (заступник головного редактора) – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Малій Х. В. (відповідальний секретар) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургії та інноваційних технологій, керівник науково-дослідного департаменту, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Члени редакційної колегії:

Бейгельзімер Я. Ю. – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник, Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О.Галкіна Національної академії наук України

Бондаренко А. О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інжинірингу та дизайну в машинобудуванні, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Грудкіна Н. С. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Пашинська О. Г. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Чупринов Є. В. – кандидат технічних наук, доцент, в.о. проректора з наукової роботи, Державний університет економіки і технологій

Шаповал О. О. – доктор технічних наук, професор, старший дослідник, професор кафедри машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Kostrzyzhev A. – PhD, Університет Квінсленду, Австралія

Lypchanskyi O. – PhD, Гірничо-металургійна академія ім. Станіслава Сташиця, Польща

Taran A. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри доріг і мостів, Жешувська Політехніка ім. Ігнація Лукасевича, Польща

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

Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. Одеса : Видавничий дім «Гельветика». 2026. № 7. 292 с.

ISSN 3041-2080 (print)

ISSN 3041-2099 (online)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026

ЗМІСТ

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Davydova Iryna Volodymyrivna, Bondarchuk Vasyl Mykolaiovych, Panasyuk Andriy Viktorovych, Shlapak Volodymyr Oleksandrovych, Kyrylenko Nina Pavlivna ECOLOGICAL RISKS OF RAW MATERIAL EXTRACTION AND ENRICHMENT FOR EV BATTERIES AND THE IMPORTANCE OF EXTENDED PRODUCER RESPONSIBILITY.....	9
Максимова Наталія Миколаївна, Петрушина Галина Олександрівна, Базель Ярослав Рудольфович ГІДРОХІМІЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ВОД РІЧКИ ДНІПРО В РАЙОНІ СКИДУ ПІДЗЕМНИХ І ПОВЕРХНЕВИХ СТОКІВ.....	19
Петльований Михайло Володимирович, Бучавий Юрій Володимирович, Легеза Юлія Олександрівна ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗВИТКУ ПРОВАЛЬНИХ ЗОН ШАХТ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА РОСЛИННИЙ ПОКРИВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ.....	27

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

Мірошніченко Сергій Олександрович ВПЛИВ СТРАТЕГІЇ ФОРМУВАННЯ НАВЧАЛЬНОГО ВІКНА НА ЯКІСТЬ ПЕРЕНАВЧАННЯ МОДЕЛІ XGBOOST В УМОВАХ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ДРЕЙФУ B2B-ТРАНЗАКЦІЙ.....	38
Суботін Олег Володимирович, Петрухін Ярослав Ігорович, Солод Юлія Анатоліївна, Сімкін Олександр Ісакович РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАРЯЧОГО МЕТАЛУ.....	50
Tanasuik Dmytro Olehovich, Razzhyvin Oleksii Valeriiovych PNEUMOTHORAX SEGMENTATION ON CHEST X-RAYS: PROGRESSIVE FINE-TUNING AND THRESHOLD-BASED PREDICTION REFINEMENT.....	59

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Воронов Олександр Сергійович, Ключко Оксана Юріївна СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГОВАНИХ ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ МАСИВНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ВИЛИВКІВ.....	67
Міхєєнко Денис Юрійович ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ДВОШАРОВИХ БІМЕТАЛІЧНИХ ЛИСТІВ З МЕХАНІЧНИМ ЗВ'ЯЗКОМ.....	74
Пашинський Володимир Вікторович, Бойко Ігор Олександрович ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ.....	79
Топоров Андрій Анатолійович, Алексєєва Ольга Євгенівна, Попова Ольга Юріївна АНАЛІЗ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІКРОЧАСТИНОК ТРИОКСИДУ ВОЛЬФРАМУ WO ₃ З ШАМОТНИМ ВОГНЕТРИВОМ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ УДАРІ.....	85
Чжуньвень Цзі, Копилов В'ячеслав Іванович, Завдовєєв Анатолій Вікторович, Пашинська Олена Генріхівна CALPHAD-АНАЛІЗ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СПЛАВУ FeCOALNiTA, ВИГОТОВЛЕНОГО МЕТОДОМ АВДЗ.....	94

МЕТАЛУРГІЯ

Бушуй Наталя Миколаївна, Кухар Володимир Валентинович ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ШЛЯХОМ ПЕРЕХОДУ НА ХОЛОДНОТВЕРДІЮЧІ СУМІШІ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ТА РЕГРЕСІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ.....	101
Gnatenko Mykhailo Olehovych, Matveishyn Mykyta Vitaliovych, Serhiienko Olha Serhiiivna, Ivanov Valery Hryhorovych THE INFLUENCE OF MOLD TYPE ON SURFACE QUALITY PARAMETERS AND STRUCTURE IN THE PRODUCTION OF ARTISTIC CASTINGS USING PATTERNS OBTAINED BY ADDITIVE METHODS.....	111
Грибков Едуард Петрович, Малій Олександр Геннадійович, Пушкаренко Олександр Олександрович ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ КИСНЕВОГО КОНВЕРТЕРА.....	118
Письмарьов Костянтин Євгенович, Єфімова Вероніка Гаріївна, Смірнов Юрій Олексійович, Малій Христина Василівна ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТАЛЕВІЙ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДА СТЕРЕОЛОГІЧНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ.....	124
Спічак Олександр Юрійович ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕНЕСЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ З УРАХУВАННЯМ ВІДНОСНОГО НАПРАЦЮВАННЯ РОБОЧИХ ВАЛКІВ ТА ВПЛИВУ РІЗНИХ ПРОКАТНИХ ЕМУЛЬСІЙ.....	130
Чупринов Євген Валерійович ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІЗНИХ СУМІШЕЙ ГЛИНИСТИХ СУСПЕНЗІЙ.....	137

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Бабенко Марина Олегівна, Вірич Світлана Олександрівна АЛГОРИТМ ГРУПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ УРАХУВАННЯМ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ ОБЛАДНАННЯ....	145
Бурлуцький Олексій Вікторович МЕТАЛОГРАФІЧНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ ТРАНСПОРТНОЇ ЦИСТЕРНИ ПІСЛЯ БАГАТОРІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В УМОВАХ ІНТЕНСИВНИХ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	152
Каграманян Артур Олександрович, Аракелян Тигран Артурович АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ СПИРАННЯ КОТЛІВ ВАГОНІВ-ЦИСТЕРН.....	162
Корнієнко Ярослав Микитович, Стьопчкін Денис Валерійович МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ РІДКОЇ ФАЗИ В ЧАШОВОМУ РОТАЦІЙНОМУ ДИСПЕРГАТОРІ.....	168
Фомін Олексій Вікторович, Кузьменко Сергій Валентинович, Шелест Сергій Миколайович, Лясковець Юрій Степанович, Мазниченко Максим Олександрович МАТЕМАТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ КРИТИЧНИХ РЕЖИМІВ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З РІДКИМ НАПОВНЕННЯМ.....	177
Цимбал Богдан Михайлович, Койфман Олексій Олександрович ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДРОНА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ УМОВ ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ....	183

ГІРНИЦТВО

Григор'єв Юліан Ігорович, Григор'єв Ігор Євгенійович, Лебеденко Володимир Володимирович АДАПТИВНА МОДЕЛЬ КЛАСИФІКАЦІЇ ГІРНИЧОЇ МАСИ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ РЕЖИМУ ГІРНИЧИХ РОБІТ СИСТЕМИ «КАР'ЄР-ТЕХНОГЕННЕ РОДОВИЩЕ».....	195
Каменець В'ячеслав Ігорович, Поступаєв Дмитро Олександрович РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЄКТУ ПІДГОТОВКИ ГОРИЗОНТУ 607 М ШАХТИ ІМЕНІ КОЛАЧЕВСЬКОГО ПРАТ «ЦЕНТРАЛЬНИЙ ГЗК» В УСКЛАДНЕНИХ УМОВАХ.....	202
Купін Андрій Іванович, Вільгельм Марина Миколаївна ВИКОРИСТАННЯ ТОНКОГО ГРОХОЧЕННЯ В СХЕМАХ ПЕРЕРОБКИ ТОНКОПОДРІБНЕНИХ МАГНЕТИТОВИХ ПРОДУКТІВ ЗБАГАЧЕННЯ.....	212
Мітченко Дмитро Володимирович ОЦІНКА МІНІМАЛЬНО ВИЯВЛЮВАНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗСУВНИХ СХИЛІВ ЗА ДАНИМИ БАГАТОРАЗОВОГО НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ.....	218
Олійник Тетяна Анатоліївна, Гапоненко Роман Костянтинович АНАЛІЗ СУЧАСНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО ПОДРІБНЕННЯ МАГНЕТИТОВИХ КВАРЦИТІВ.....	226
Сахно Іван Георгійович, Сахно Світлана Володимирівна, Богомаз Ольга Петрівна, Андрєєва Антоніна Валеріївна ГЕОМЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ НА ОСІДАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ І СТІЙКІСТЬ ПОКРИВНИХ ПОРІД ВУГЛЕПОРОДНОЇ ТОВЩІ.....	237
Тітов Данил Андрійович, Кальчук Сергій Володимирович МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПРЯМОВАНОГО РУЙНУВАННЯ КРИСТАЛІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА В КОМБІНОВАНОМУ РЕЖИМІ.....	247

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Куртов Анатолій Ігорович, Дубовик Семен Олександрович, Куртов Дмитро Анатолійович СИНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ МІННОГО РИЗИКУ В СИСТЕМІ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ.....	255
Майстренко Володимир Володимирович, Кружилко Олег Євгенович, Овчинников Олексій Олександрович, Каракай Максим Сергійович, Чеберячко Юрій Іванович НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ У МОРСЬКИХ ПОРТАХ НА ОСНОВІ ДВОКОНТУРНОЇ МОДЕЛІ ПОРТ-Р.....	265
Столбченко Олена Володимирівна, Лісовицька Ірина Анатоліївна, Надточий Володимир Валентинович, Лапко Кирило Андрійович РОЗРАХУНОК РИЗИКУ ТРАВМАТИЗМУ ПРАЦІВНИКІВ ВІД ВТОМИ.....	271
Цопа Віталій Андрійович, Чеберячко Сергій Іванович, Володченкова Наталія Валеріївна, Луценко Іван Миколайович, Осинська Вікторія Сергіївна КОГНІТИВНІ ВИКРИВЛЕННЯ ТА МЕНТАЛЬНІ ПАСТКИ В УПРАВЛІННІ ПРОФЕСІЙНИМИ РИЗИКАМИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ЗДОРОВ'Я ТА БЕЗПЕКОЮ ПРАЦІ.....	279

CONTENTS

ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES

- Davydova Iryna, Bondarchuk Vasyl, Panasyuk Andriy, Shlapak Volodymyr, Kyrylenko Nina**
 ECOLOGICAL RISKS OF RAW MATERIAL EXTRACTION AND ENRICHMENT FOR EV BATTERIES AND THE IMPORTANCE OF EXTENDED PRODUCER RESPONSIBILITY....9
- Maksymova Nataliia, Petrushyna Halyna, Basel Yaroslav**
 HYDROCHEMICAL ASSESSMENT OF THE WATER QUALITY OF THE RIVER DNIEPER IN THE AREA WHERE UNDERGROUND AND SURFACE WATER DISCHARGE.....19
- Petlovanyi Mykhailo, Buchavyi Yurii, Leheza Yuliia**
 STUDY OF THE EVOLUTION OF MINE COLLAPSE ZONES AND THEIR EFFECT ON VEGETATION COVER USING REMOTE SENSING TECHNIQUES.....27

AUTOMATION, COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES AND ROBOTICS

- Miroshnichenko Serhii**
 IMPACT OF TRAINING WINDOW FORMATION STRATEGY ON XGBOOST MODEL RETRAINING QUALITY UNDER CONCEPT DRIFT IN B2B TRANSACTIONS.....38
- Subotin Oleg, Petrukhin Yaroslav, Solod Yuliia, Simkin Oleksandr**
 DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A MEASURING SYSTEM FOR DETERMINING THE TEMPERATURE OF HOT METAL.....50
- Tanasuik Dmytro, Razzhyvin Oleksii**
 PNEUMOTHORAX SEGMENTATION ON CHEST X-RAYS: PROGRESSIVE FINE-TUNING AND THRESHOLD-BASED PREDICTION REFINEMENT.....59

MATERIALS SCIENCE

- Voronov Oleksandr, Klochko Oksana**
 STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPLEX-ALLOYED HIGH-CHROMIUM CAST IRONS FOR MASSIVE COMPOSITE CASTINGS.....67
- Mikheienko Denys**
 EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS OF OBTAINING TWO-LAYER BIMETALLIC SHEETS WITH A MECHANICAL BOND.....74
- Pashynskyi Volodymyr, Boyko Igor**
 THE CHOICE OF MATERIALS FOR HARDFACING OF METALLURGICAL EQUIPMENT PARTS, WORKING AT ABRASIVE WEAR CONDITIONS AT HIGH TEMPERATURES.....79
- Toporov Andrii, Aleksieieva Olha, Popova Olha**
 ANALYSIS OF CONTACT INTERACTION BETWEEN A TUNGSTEN TRIOXIDE (WO_3) MICROPARTICLE AND A FIRECLAY REFRACTORY UNDER HIGH-VELOCITY IMPACT.....85
- Junwen Ji, Kopylov Viacheslav, Zavdoveev Anatoliy, Pashinska Elena**
 CALPHAD ANALYSIS OF THE CRYSTALLIZATION OF THE FECOALNITA ALLOY PRODUCED BY THE WAAM METHOD.....94

METALLURGY

- Bushui Nataliia, Kukhar Volodymyr**
 JUSTIFICATION OF THE PROJECT FOR MODERNIZATION OF FOUNDRY PRODUCTION BY TRANSITION TO COLD-HARDENING MIXTURES BASED ON ENERGY INTENSITY ANALYSIS AND REGRESSION MODELING OF THE MOULDING PROCESS.....101

Gnatenko Mykhailo, Matveishyn Mykyta, Serhiienko Olha, Ivanov Valery THE INFLUENCE OF MOLD TYPE ON SURFACE QUALITY PARAMETERS AND STRUCTURE IN THE PRODUCTION OF ARTISTIC CASTINGS USING PATTERNS OBTAINED BY ADDITIVE METHODS.....	111
Hrybkov Eduard, Malii Oleksandr, Pushkarenko Oleksandr DETERMINING THE SERVICE LIFE OF OXYGEN CONVERTER DRIVE COMPONENT.....	118
Pismarev Konstantin, Yefimova Veronika, Smirnov Yuriy, Malii Khrystyna ASSESSMENT OF THE DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEEL PRODUCTS USING THE STEREOLOGICAL RECONSTRUCTION METHOD.....	124
Spichak Oleksandr DETERMINATION OF THE ROUGHNESS IMPRINT COEFFICIENT IN COLD ROLLING WITH CONSIDERATION OF THE RELATIVE WORK ROLL SERVICE LIFE AND THE INFLUENCE OF DIFFERENT ROLLING EMULSIONS.....	130
Chuprynov Yevhen RESEARCH OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF VARIOUS MIXTURES OF CLAY SUSPENSIONS.....	137

INDUSTRIAL ENGINEERING

Babenko Maryna, Virych Svitlana ALGORITHM FOR GROUPING PARTS CONSIDERING EQUIPMENT UTILIZATION.....	145
Burlutskyi Oleksii METALLOGRAPHIC ASSESSMENT OF THE DEGRADATION OF STRUCTURAL STEEL IN A TRANSPORT TANK FOLLOWING MANY YEARS OF SERVICE UNDER CONDITIONS OF INTENSE DYNAMIC LOADING.....	152
Kagramanian Artur, Arakelian Tyhran ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR IMPROVING THE SUPPORT SYSTEMS OF TANK WAGON BOILERS.....	162
Korniienko Yaroslav, Stopochkin Denys MATHEMATICAL MODEL OF LIQUID PHASE MOTION IN A ROTARY CUP ATOMIZER FOR SEED TREATMENT IN A FLUIDIZED BED.....	168
Fomin Oleksii, Kuzmenko Serhii, Shelest Serhii, Liaskovets Yuriy, Maznychenko Maksym MATHEMATICAL PREDICTION OF CRITICAL MOTION MODES OF VEHICLES WITH LIQUID FILLING.....	177
Tsymbal Bohdan, Koifman Oleksiy RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF A DRONE FOR MONITORING WORKING CONDITIONS AND TECHNOLOGICAL SAFETY AT MINING AND METALLURGICAL COMPLEX ENTERPRISES.....	183

MINING

Hryhoriev Yulian, Hryhoriev Ihor, Lebedenko Volodymyr AN ADAPTIVE MODEL OF GEOMATERIAL CLASSIFICATION FOR STRATEGIC MINE DESIGN WITHIN THE "OPEN-PIT – TECHNOGENIC DEPOSIT" FRAMEWORK.....	195
Kamenets Viacheslav, Postupaiev Dmytro IMPLEMENTATION OF THE PROJECT TO PREPARE THE 607-METRE LEVEL OF THE KOLACHEVSKY MINE, OWNED BY PJSC 'CENTRAL MINING AND PROCESSING PLANT', UNDER CHALLENGING CONDITIONS.....	202

Kupin Andrey, Vilhelm Maryna

THE USE OF FINE SCREENING IN PROCESSING CIRCUITS FOR FINELY GROUND
MAGNETITE PRODUCTS BENEFICATION 212

Mitchenko Dmytro

ASSESSMENT OF MINIMALLY DETECTABLE DEFORMATIONS OF LANDSLIDE SLOPES
BASED ON MULTI-TEMPORAL TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA.....218

Oliinyk Tetiana, Haponenko Roman

ANALYSIS OF MODERN SCIENTIFIC RESEARCH ON PRACTICAL APPLICATION
OF APPROACHES TO GRINDING MAGNETITE QUARTZITES..... 226

Sakhno Ivan, Sakhno Svitlana, Bohomaz Olha, Andrieieva Antonina

GEOMECHANICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF UNDERGROUND COAL GASIFICATION
ON GROUND SETTLEMENT AND THE STABILITY OF THE OVERLYING STRATA
IN A COAL-BEARING FORMATION.....237

Titov Danil, Kalchuk Sergii

MATHEMATICAL MODELING OF DIRECTED DESTRUCTION OF CRYSTALLINE
MEDIUM IN COMBINED MODE.....247

CIVIL SECURITY

Kurtov Anatolii, Dubovyk Semen, Kurtov Dmytro

SYNERGETIC MODEL FOR INTEGRAL ASSESSMENT OF MINE RISK
IN THE CIVIL PROTECTION SYSTEM.....255

**Maistrenko Volodymyr, Kruzhilko Oleg, Ovchynnikov Oleksii,
Karakai Maksym, Cheberyachko Yuriy**

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF ASSESSING OCCUPATIONAL RISKS
IN SEAPORTS BASED ON THE TWO-CIRCUIT PORT-R MODEL..... 265

Stolbchenko Olena, Lisovytska Irina, Nadtochy Volodymyr, Lapko Kyrilo

CALCULATION OF THE RISK OCCUPATIONAL INJURY DUE TO FATIGUE.....271

**Tsopa Vitaly, Cheberyachko Serhiy, Volodchenkova Nataliia,
Lutsenko Ivan, Osynska Viktoriia**

COGNITIVE BIASES AND MENTAL TRAPS IN OCCUPATIONAL RISK MANAGEMENT
WITHIN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY MANAGEMENT SYSTEMS.....279

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 504.05:622:621.355:658.567

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-1>

ECOLOGICAL RISKS OF RAW MATERIAL EXTRACTION AND ENRICHMENT FOR EV BATTERIES AND THE IMPORTANCE OF EXTENDED PRODUCER RESPONSIBILITY

Davydova Iryna Volodymyrivna,

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID ID: 0000-0001-6535-3948

Bondarchuk Vasyl Mykolaiovych,

Senior Lecturer at the Department of Robotics, Electric Power Engineering and Automation
named after Prof. B. B. Samotokin
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID ID: 0000-0003-2793-8720

Panasyuk Andriy Viktorovych,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mine Surveying
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID ID: 0000-0001-7468-2022

Shlapak Volodymyr Oleksandrovysh,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Mine Surveying
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID ID: 0000-0002-4183-1922

Kyrylenko Nina Pavlivna,

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID ID: 0000-0001-7222-9320

The article analyzes the environmental risks of mining, enrichment and processing of mineral raw materials for the production of electric vehicle batteries and determines the importance of extended producer responsibility (EPR) to reduce this impact. The key materials of the battery industry are characterized – lithium, cobalt, nickel, manganese and graphite – and their role in modern types of batteries (NMC, NCA, LFP) is shown. Data on the geography of mining of critical minerals and the growth of global demand for them in connection with the development of electromobility are summarized. Special attention is paid to the impact on water resources, soils, ecosystems and atmospheric air, in particular the risks of depletion of aquifers, acid mine drainage, formation of enrichment tailings, dust and gas emissions. Based on the LCA approach, it is shown that the production of electric vehicles, especially batteries, forms a higher initial ecological footprint compared to cars with internal combustion engines, however, during operation, electric vehicles provide lower total greenhouse gas emissions. It is substantiated that RBB, eco-design, supply chain due diligence, recycling, second-life approaches and the implementation of battery passport are systemic tools for the transition to a circular economy. The methodological basis is the analysis of scientific sources, a comparative description of technological stages and the systematization of environmental risks. Recommendations are formulated for the standardization of sustainable production, the development of "green" processing technologies and strengthening international regulation in the field of EV batteries.

Key words: electric vehicles, batteries, critical minerals, environmental risks, extended producer responsibility, circular economy, battery passport, LCA.

Давидова Ірина, Бондарчук Василь, Панасюк Андрій, Шлапак Володимир, Кириленко Ніна. Екологічні ризики видобутку та збагачення сировини для акумуляторів для електромобілів та важливість розширеної відповідальності виробника

У статті проаналізовано екологічні ризики видобутку, збагачення та переробки мінеральної сировини для виробництва акумуляторів електромобілів і визначено значення розширеної відповідальності виробника (РВВ) для зниження цього впливу. Охарактеризовано ключові матеріали батарейної індустрії – літій, кобальт, нікель, марганець і графіт – та показано їх роль у сучасних типах акумуляторів (NMC, NCA, LFP). Узагальнено дані щодо географії видобутку критичних мінералів і зростання глобального попиту на них у зв'язку з розвитком електромобільності. Особливу увагу приділено впливу на водні ресурси, ґрунти, екосистеми та атмосферне повітря, зокрема ризикам виснаження водоносних горизонтів, кислотного дренажу шахт, утворення хвостів збагачення, пилових і газових викидів. На основі підходу LCA показано, що виробництво електромобілів, особливо акумуляторів, формує вищий початковий екологічний слід порівняно з автомобілями з ДВЗ, однак упродовж експлуатації електромобілі забезпечують нижчі сукупні викиди парникових газів. Обґрунтовано, що РВВ, eco-design, due diligence ланцюгів постачання, recycling, second-life підходи та впровадження battery passport є системними інструментами переходу до циркулярної економіки. Методичну основу становлять аналіз наукових джерел, порівняльний опис технологічних етапів і систематизація екологічних ризиків. Сформульовано рекомендації щодо стандартизації сталого видобутку, розвитку «зелених» технологій переробки та посилення міжнародного регулювання у сфері EV-акумуляторів.

Ключові слова: електромобілі, акумулятори, критичні мінерали, екологічні ризики, розширена відповідальність виробника, циркулярна економіка, battery passport, LCA.

Introduction. The rapid development of electric mobility is currently regarded as one of the key directions in the global transition to a low-carbon economy [1]. Electric vehicles are designed to reduce greenhouse gas emissions, improve urban air quality, and decrease dependence on fossil fuels. In this context, demand for lithium-ion batteries – the primary energy storage technology for electric transport – is growing at an unprecedented rate [2]. This, in turn, drives a sharp increase in the extraction and enrichment of critical mineral raw materials, including lithium, cobalt, nickel, manganese, and graphite [3].

Despite the evident environmental advantages of electric vehicles during operation, the upstream stages of battery production exert significant ecological pressure. Mining operations are frequently accompanied by excessive water consumption, land degradation, ecosystem disruption, and contamination of soils and water bodies with heavy metals and chemical reagents [4]. Mineral enrichment and processing generate additional risks – ranging from toxic emissions to the generation of hazardous waste capable of causing prolonged environmental damage [5]. This raises a critical question: to what extent can electric mobility be considered "green" if its raw material supply chains impose a substantial environmental burden [6].

In this context, the concept of Extended Producer Responsibility (EPR) is gaining increasing significance. Its mechanisms are intended to ensure producer accountability for the environmental consequences of products throughout their entire life cycle – from raw material origin to end-of-life battery disposal. EPR incentivizes eco-design, responsible sourcing,

supply chain transparency, and the development of a circular economy [7].

The purpose of this article is to provide a comprehensive analysis of the environmental impact of the extraction and enrichment of mineral raw materials used in electric vehicle battery production, as well as to substantiate the key role of Extended Producer Responsibility in fostering a more sustainable and environmentally responsible production cycle.

To achieve the stated objective, the article sets the following tasks: to characterize the principal types of mineral raw materials used in the production of modern electric vehicle batteries; to analyze the geography and scale of critical mineral extraction; to examine the environmental impact of mineral extraction and enrichment processes; to compare the ecological footprint of battery production with that of conventional automotive infrastructure based on life cycle assessment (LCA); and to formulate recommendations for improving Extended Producer Responsibility systems, enhancing supply chain sustainability, and implementing circular approaches in battery manufacturing.

Research methods and techniques. The study is grounded in a comprehensive interdisciplinary approach that integrates elements of ecological economics, institutional analysis, and the circular economy concept. The methodological foundation of the work is a systems approach, which enables the examination of the EV battery industry as an integral structure encompassing all stages of the battery life cycle – from critical mineral extraction to recycling and material reuse.

The research employs an analysis of scientific publications, regulatory acts, and strategic

documents in the fields of sustainable development and Extended Producer Responsibility (EPR), as well as a comparative analysis of contemporary regulatory practices. To assess environmental aspects, a life-cycle thinking approach was applied, enabling the identification of key ecological impact points and the potential for implementing circular mechanisms, including eco-design, recycling technologies, and the battery passport system. The synthesis of the results enabled the formulation of conclusions and practical recommendations to enhance the effectiveness of EPR implementation in the battery industry.

Results and discussion. The rapid growth of the electric vehicle market is driving a sharp increase in demand for minerals used in lithium-ion battery production. The key materials include lithium, cobalt, nickel, manganese, and graphite (Fig. 1). These minerals determine the energy density, operational stability, longevity, and safety of batteries. According to international energy research estimates, global demand for battery-grade minerals may increase several-fold by 2030 compared to early 2020s levels, thereby intensifying the burden on the mining industry and elevating environmental risks.

Lithium is the fundamental element in nearly all modern electric vehicle batteries, as it facilitates charge transfer within the cell and enables high energy density at a relatively low mass. The principal lithium deposits are concentrated in the so-called "Lithium Triangle" of South America (Chile, Argentina, Bolivia), as well as in hard-rock deposits in Australia (Fig. 2). Over the past decade, lithium demand has increased several-fold.

Projections indicate that the electric vehicle sector may consume over 80% of extracted lithium within the next decade.

Cobalt plays a vital role in stabilizing cathode materials and extending battery service life. It ensures the structural stability of batteries and enhances their performance. Approximately 60–70% of the global cobalt supply is mined in the Democratic Republic of Congo, which gives rise not only to economic but also to environmental risks associated with intensive extraction, generation of toxic waste, and contamination of soils and water resources. Consequently, many battery manufacturers are progressively seeking to reduce the cobalt content in next-generation batteries.

Nickel is one of the key elements that enables higher battery energy density and extended electric vehicle driving range. Modern batteries increasingly employ cathodes with elevated nickel content. Demand for battery-grade nickel is expected to increase several-fold by mid-century. The principal producers are Indonesia, the Philippines, and several other countries.

Manganese is used in cathode materials to enhance battery stability and reduce costs. Unlike cobalt, this element is more abundant in nature; however, its extraction and processing can also have adverse environmental effects, including soil contamination, acid mine drainage, and elevated levels of airborne particulate pollution. In contemporary battery systems, manganese is frequently used in combination with nickel and cobalt to achieve a balance between performance, safety, and economic viability.

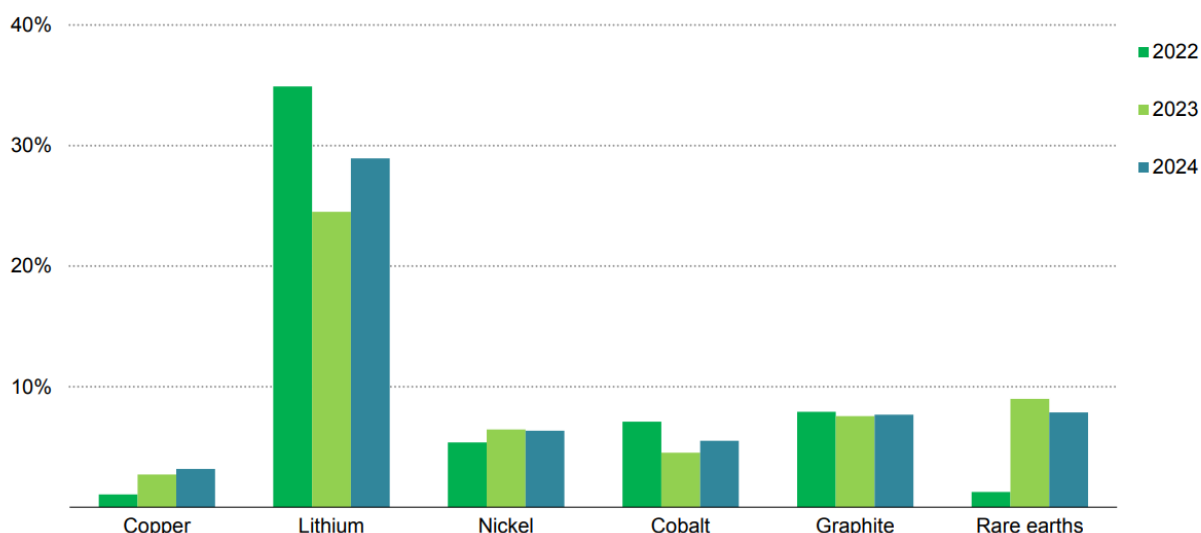


Fig. 1. Global demand dynamics for key electric vehicle battery minerals (lithium, cobalt, nickel, graphite) in 2022–2024 [9]

Graphite is the primary anode material in most lithium-ion batteries. Notably, producing a single electric vehicle battery typically requires more graphite by mass than lithium. A significant share of global natural graphite production is concentrated in China, creating a degree of global market dependence on a single region.

It is also essential to consider that different types of electric vehicle batteries utilize various combinations of these minerals (Fig. 3). For instance, NMC (nickel-manganese-cobalt) batteries are among the most widely used, as they combine high energy density with operational stability. NCA (nickel-cobalt-aluminum) technology emphasizes high nickel content, enabling greater vehicle driving range. In contrast, LFP (lithium iron phosphate) batteries contain neither cobalt nor nickel, are characterized by enhanced safety and lower cost, and consequently, their adoption in the mass-market electric vehicle segment has been growing rapidly in recent years.

These minerals form the foundation of the modern battery industry, yet simultaneously pose significant environmental challenges associated with their extraction and enrichment.

For this reason, issues of environmental risk, as well as mechanisms for responsible resource management, including Extended Producer Responsibility, are becoming central to the sustainable development of the electric mobility sector.

Although electric vehicles are regarded as a tool for transport decarbonization, the initial stages of their life cycle, including the extraction and processing of mineral raw materials, are associated with substantial environmental burdens (Table 1).

Impact on water resources. Lithium extraction from brine deposits in the South American region encompassing Salar de Atacama, Salar de Uyuni, and Salar del Hombre Muerto is particularly water intensive. The technology involves pumping underground saline water followed by multi-month evaporation in open-air ponds. This process leads to a decline in groundwater levels in aquifers, disrupting the hydrological balance of desert ecosystems. In regions experiencing chronic water scarcity, this creates competition between mining companies' water needs and the water supply for local communities and traditional agriculture.

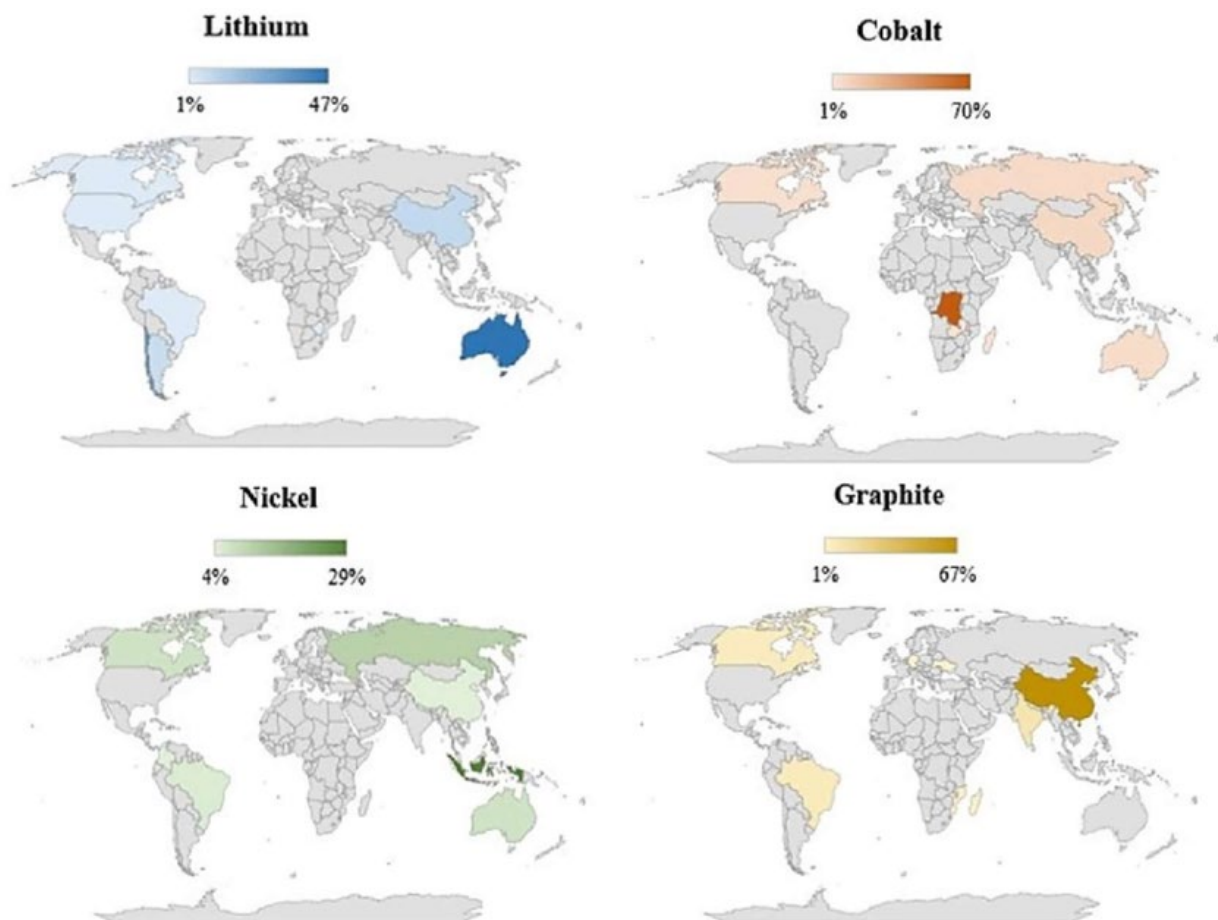


Fig. 2. Global Distribution of Critical Battery Minerals [10]

The extraction of nickel and cobalt, which are widely used in NMC (nickel-manganese-cobalt) battery cathodes, poses a risk of acid mine drainage. Oxidation of sulfide ores results in acidic effluents that can dissolve and transport heavy metals into surface and groundwater. Tailings storage facilities and enriching waste impoundments pose an additional hazard, as they may serve as sources of chronic or accidental contamination. Thus, the

water footprint of battery raw material production represents one of the key environmental challenges facing the electric vehicle industry.

Impact on soils and ecosystems. The extraction of nickel, cobalt, and manganese is frequently carried out through open-pit mining, resulting in large-scale landscape transformation. Removal of the fertile soil layer, formation of quarries and waste dumps disrupt

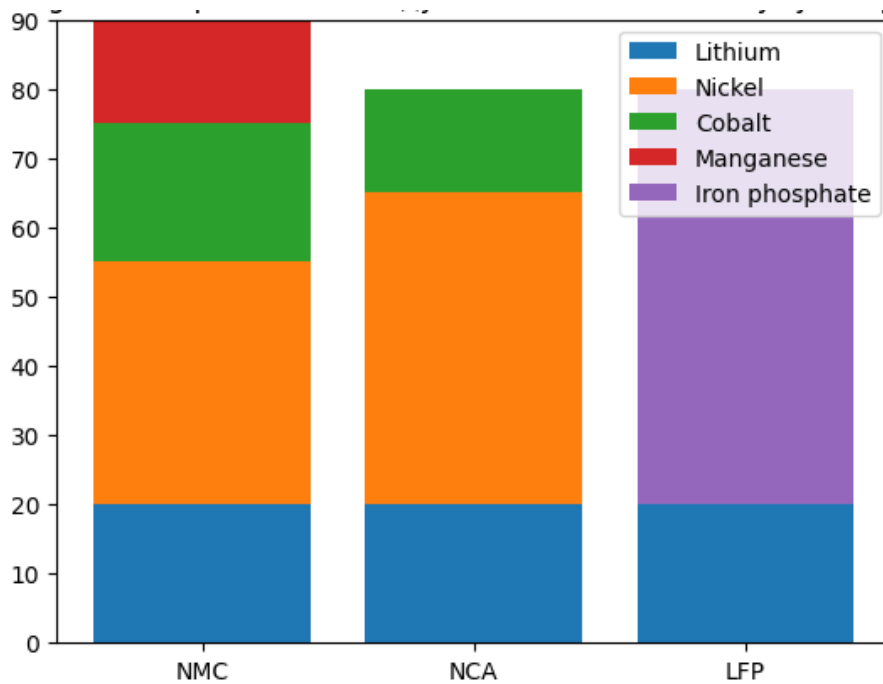


Fig. 3. Composition comparison of the main types of electric vehicle batteries (NMC, NCA, LFP), Relative material share (%) [11]

Table 1

Comparative characteristics of the environmental impact of mineral resource extraction for electric vehicle battery production on environmental components

Mineral Resource	Impact on Water Resources	Impact on Soils and Ecosystems	Impact on Air
Lithium	Intensive brine pumping; groundwater level depletion; risk of salinization of freshwater aquifers; alteration of regional hydrological balance	Disruption of salt flat ecosystem structure; degradation of topsoil layer; alteration of natural water-salt regime	Dust during transportation and drying; emissions from chemical processing of lithium carbonate
Cobalt	Acid mine drainage; heavy metal infiltration into surface and groundwater; leakage risks from tailings storage facilities	Soil degradation from open-pit mining; accumulation of toxic waste; fragmentation of natural biotopes	Metal-containing dust; toxic aerosols during enrichment and smelting; sulfur oxide emissions
Nickel	Water contamination by effluent solutions; acidification of water bodies; increased turbidity due to erosion processes	Large-scale removal of vegetation cover; tropical soil erosion; formation of waste dumps	Significant SO ₂ and NO _x emissions during pyrometallurgical processing; metallic dust
Manganese	Potential contamination by mine water; localized increase in metal concentrations	Landscape transformation; formation of waste dumps; disturbance of soil cover	Dust emissions during crushing; emissions from thermal ore processing
Graphite (natural)	Water use in flotation processes; contamination by slurries and reagents	Land disturbance from open-pit mining; accumulation of enrichment waste	Fine-dispersed graphite dust; emissions from high-temperature purification

the natural structure of territories and lead to land degradation.

Rehabilitation of such areas requires prolonged reclamation efforts and does not guarantee the restoration of original ecosystems. Tropical regions are particularly vulnerable, as the expansion of mining areas is accompanied by deforestation, habitat fragmentation, and biodiversity loss. Similar problems arise in nickel extraction areas within tropical and subtropical ecosystems, where heavy rainfall intensifies erosion processes following vegetation removal. Land subsidence associated with underground mining and secondary erosion after operations poses long-term geoecological risks.

Emissions and air pollution. Battery raw materials undergo a complex cycle of enrichment and metallurgical processing, which is accompanied by dust and gaseous pollutant emissions. Delicate particulate matter containing nickel, cobalt, or other metals can disperse through the atmosphere and accumulate in the human body. Exposure to such aerosols is associated with an elevated risk of respiratory and toxicological disorders. Metallurgical processes used to obtain high-purity cathode materials involve energy-intensive furnaces and chemical reagents, which can form sulfur oxides, nitrogen oxides, and other harmful compounds.

Environmental consequences of mineral enrichment and processing for battery production. The enrichment and chemical-metallurgical processing stages of mineral raw materials intended for lithium-ion battery manufacturing constitute one of the most environmentally intensive segments of the entire electric vehicle value chain. It is at this stage that the transition occurs from ore or brine to high-purity compounds of lithium, nickel, cobalt, manganese, and graphite suitable for the synthesis of cathode and anode materials.

Flotation, leaching, precipitation, and purification processes involve the use of substantial volumes of acids, alkalis, organic solvents, and specialized

reagents. During hydrometallurgical processing of nickel and cobalt ores, sulfuric acid, ammonia solutions, and extractants are widely employed to ensure selective metal recovery from concentrates. In the production of lithium compounds, reagents are used to precipitate high-purity lithium carbonate or lithium hydroxide.

Improper handling of chemical reagents can cause localized contamination of soil and water, as well as the generation of toxic air emissions. Attention should be paid to facilities located in countries with less stringent environmental standards, where emission controls and wastewater treatment may be inadequate. On a global scale, a significant share of graphite and lithium compound processing is concentrated in China, intensifying the regional concentration of environmental burdens.

The enrichment process generates a substantial volume of waste in the form of tailings – fine-dispersed ore residues remaining after the extraction of valuable components. These materials are stored in specialized slurry impoundments or tailings storage facilities, which are retained by dams. Tailings may contain residual concentrations of heavy metals, sulfides, and reagents that pose environmental hazards. Failure of tailings dam integrity can lead to a large-scale release of slurry into river systems and adjacent territories. Even without an accidental breach, prolonged seepage of filtrate from tailings facilities can cause chronic groundwater contamination. For raw materials used in battery production, the tailings problem is particularly acute due to the large volumes of low-grade ore processing, particularly for nickel and cobalt.

In addition to enrichment tailings, the processing stage generates slag, filtration sediments, spent reagents, and contaminated aqueous solutions. Improper management of such waste can cause secondary environmental contamination and the accumulation of toxic substances in the biosphere.

An additional challenge is the limited availability

Table 2

Environmental consequences of mineral enrichment and processing for electric vehicle battery production

Processing Stage	Principal Environmental Risks	Impact Type
Flotation and enrichment	Use of chemical reagents; generation of tailings; risk of water and soil contamination	Water, soils
Hydrometallurgical leaching	Acidic effluents; toxic solutions; potential seepage of reagents into groundwater	Water, soils
Pyrometallurgical smelting	High CO ₂ emissions; formation of SO ₂ and NO _x ; metal-containing dust	Air, climate
Refining and purification	Generation of highly concentrated chemical waste; risk of secondary contamination	Water, air
Storage of tailings and industrial waste	Risk of tailings dam failure; long-term contamination of soils and water	Water, soils

of technologies for the complete disposal or reuse of waste. In some cases, waste is stockpiled without adequate stabilization, increasing the risk of its migration into the environment. At the same time, the development of a circular economy and spent battery recycling technologies may reduce the need for primary extraction and decrease the volume of industrial waste in the future.

The assessment of the environmental impact of electric vehicles compared to internal combustion engine vehicles is typically conducted using the Life Cycle Assessment (LCA) approach [12]. This approach encompasses all stages of a vehicle's existence – from raw material extraction and component manufacturing to operation and end-of-life disposal or recycling. In the case of electric cars, the most significant environmental impact occurs during the initial production stage, particularly in lithium-ion battery manufacturing, which requires substantial volumes of minerals, energy, and water. Conversely, in conventional vehicles, the majority of emissions are generated during operation through the combustion of fossil fuels.

The results of numerous LCA studies indicate that electric vehicle production, particularly battery manufacturing, can generate 30–70% more greenhouse gas emissions compared to the output of a gasoline or diesel vehicle (Fig. 4). This is attributable to the energy intensity of lithium, nickel, cobalt, and graphite extraction and processing. However, during the operational phase, the situation reverses: electric vehicles produce no direct tailpipe emissions, and consequently their cumulative carbon footprint progressively decreases relative to conventional transport (Fig. 5).

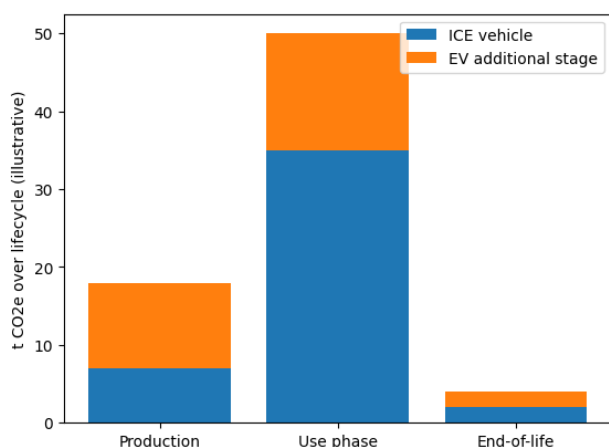


Fig. 4. Life-cycle greenhouse gas emissions of internal combustion engine (ICE) vehicles and electric vehicles (EVs) [12]

A critical question is how long, or after what mileage, an electric vehicle "compensates"

for the additional emissions associated with battery production. Most current estimates indicate that this occurs after approximately 20,000–40,000 kilometers of driving, depending on the country's energy mix. In regions with a high share of renewable energy, this period is shorter, whereas in countries where electricity is generated predominantly from coal, the advantage of electric vehicles diminishes. Beyond this "break-even point," the total life-cycle emissions of an electric vehicle are typically 40–60% lower than those of an internal combustion engine vehicle [14].

Beyond climate-related aspects, it is essential to consider other environmental factors, such as land degradation in mining areas, water resource consumption, generation of mining waste, and potential heavy metal contamination. These factors are often the primary subject of debate regarding the sustainability of EV battery production. In this context, battery recycling technologies, material reuse, and the implementation of Extended Producer Responsibility principles acquire particular significance.

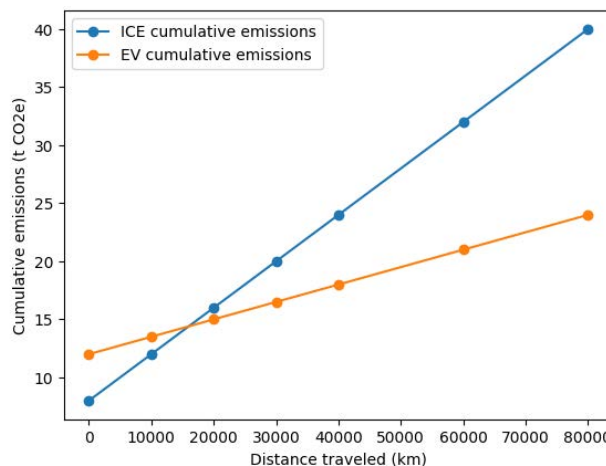


Fig. 5. Break-even point of cumulative greenhouse gas emissions between EVs and ICE vehicles [13]

Extended Producer Responsibility (EPR) is becoming one of the key mechanisms for managing environmental risks associated with the production and use of electric vehicle batteries. Since lithium-ion batteries contain a significant quantity of valuable yet environmentally sensitive materials, producer responsibility must extend beyond the manufacturing stage to encompass the entire product life cycle - from raw material extraction to disposal and material reuse. For this reason, contemporary regulatory approaches, particularly in the European Union, envisage establishing systems that incentivize companies to account for

the environmental consequences of their products as early as the design stage.

One of the key elements of EPR is the promotion of eco-design. In the context of batteries, this entails creating batteries that are easier to repair, disassemble, and recycle. For example, current research shows that up to 95% [14] of certain battery metals can be recovered, provided that proper design and recycling technologies are in place. The implementation of eco-design principles not only reduces the adverse environmental impact but also enhances production cost-efficiency, as secondary materials can be reintroduced into the manufacturing cycle (Table 3).

Another important aspect is the reduction in primary raw material consumption. Currently, the extraction of lithium, cobalt, and nickel has significant environmental consequences, including landscape disruption, water resource consumption, and the generation of mining waste. According to forecasts by international energy organizations, demand for certain critical minerals for clean energy technologies may increase several-fold by 2040. Under such conditions, the use of secondary materials from spent batteries can substantially reduce pressure on natural resources and mitigate the environmental risks of extraction.

Another critical component of EPR is supply chain control, or due diligence. Battery and electric vehicle manufacturers are increasingly required to verify the origin of minerals to avoid using raw materials extracted in violation of environmental or social standards. This approach enhances transparency in global supply chains, particularly when extraction occurs in regions with elevated ecological or social risks.

An important innovation in battery management is the introduction of the so-called "battery passport." This is a digital system containing information on the battery composition, material origin, production carbon footprint, and the battery's usage history and technical condition. Such a system enables significantly improved control over the battery life cycle, simplifies recycling, and enhances long-term resource efficiency. The implementation of battery passports is expected to become mandatory under international regulations in the coming years.

EPR is one of the principal mechanisms for transitioning from the linear "extraction – production – use – waste" model to a circular economy, which envisions the return of materials to the production cycle and the maximum extension of their useful life.

In the battery industry, this is manifested through the development of recycling systems and the reuse of battery components. Modern technologies enable the recovery of a significant proportion of valuable materials, including lithium, cobalt, nickel, and graphite, at a high degree of purity suitable for reuse in the production of new batteries. In this way, a closed material loop is formed, in which spent batteries become a resource for the next generation of energy technologies.

Conclusions and Recommendations.

Extended Producer Responsibility (EPR) is a critical tool for ensuring the sustainable development of the electric vehicle battery industry. The implementation of EPR enables the reduction of adverse environmental impacts, enhances the efficiency of the utilization of valuable materials, and facilitates the transition from a linear production model to a circular economy. Modern recycling technologies and digital tools, such as the "battery passport,"

Table 3

Role of Extended Producer Responsibility (EPR) in the EV Battery Life Cycle

Stage	Key Activities	EPR Mechanisms	Environmental / Circular Economy Impact
Raw Material Extraction	Lithium, Cobalt, Nickel mining	Material sourcing due diligence	Reduces environmental degradation; ensures ethical sourcing
Design & Manufacturing (Eco-design)	Battery design for disassembly, repair, and recycling	Eco-design principles	Up to 95% of metals recoverable; enhances recyclability
Usage in Electric Vehicles	Operation and performance monitoring	Lifecycle tracking	Extends battery life; informs reuse strategies
Supply Chain Transparency	Verification of material origins	Due diligence reporting	Ensures compliance with social and environmental standards
End-of-Life Management / Recycling	Collection, sorting, material recovery	EPR-mandated recycling programs	Recovery of Li, Co, Ni, graphite; reduces dependence on primary resources
Battery Passport / Digital Tracking	Digital records of composition, carbon footprint, usage history	Regulatory enforcement and reporting	Improves resource efficiency and enables closed-loop recycling

provide control over the battery life cycle and create conditions for resource reuse.

At the same time, implementing EPR faces several significant barriers, including low recycling rates, the lack of standardized technologies, complex logistics for spent battery collection, and limited transparency in global supply chains. These challenges require coordinated action among manufacturers, regulators, and international organizations.

To overcome existing challenges and ensure the sustainable development of the EV battery industry, the following recommendations are proposed:

1. Establishment of global standards for sustainable extraction that guarantee compliance with environmental and social norms at all stages of production.
2. Development of more environmentally friendly battery chemistries that reduce adverse environmental impact during manufacturing and recycling.

3. Support for "green" recycling technologies that ensure a high degree of valuable material recovery and their integration into secondary production.

4. Incentivizing manufacturers to adopt EPR through regulatory, economic, and informational mechanisms.

5. Implementation of the battery passport system across all EU member states and beyond to enhance battery life cycle transparency and material provenance control.

6. Development of secondary markets for second-life batteries is an essential element of the circular economy and a means of reducing dependence on primary resources.

The application of these recommendations will enable balanced development of the battery industry, enhance resource security, reduce environmental burdens, and create resilient economic models on a global scale.

BIBLIOGRAPHY:

1. International Energy Agency. Global EV Outlook. 2024. URL: <https://www.iea.org/energy-system>
2. Zubi G., Dufo-López R., Carvalho M., Pasaoglu G. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 89. P. 292–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>
3. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries: Lithium, Cobalt, Nickel. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3133/mcs2023>
4. Flexer V., Baspineiro C. F., Galli C. I. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact. *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 639. P. 1188–1204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
5. Sonter L. J., Dade M. C., Watson J. E. M., Valenta R. K. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. P. 4174. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
6. Ellingsen L. A.-W., Singh B., Strømman A. H. The size and range effect: Life-cycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11, № 5. P. 054010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010>
7. Wang X., Gaustad G., Babbitt C. W. Targeting high value metals in lithium-ion battery recycling via cathode-directed strategies. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 64. P. 345–356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.056>
8. Dunn J. B., Gaines L., Sullivan J., Wang M. Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries. *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46, № 22. P. 12704–12712. DOI: <https://doi.org/10.1021/es302420z>
9. International Energy Agency. Global Critical Minerals Outlook 2025; Global EV Outlook. 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>
10. Geographical distribution of lithium, cobalt, nickel, and graphite production in 2021. URL: https://www.researchgate.net/figure/Geographical-distribution-of-lithium-cobalt-nickel-and-graphite-production-in-2021_fig1_373895747
11. Argonne National Laboratory. GREET Model. URL: <https://www.energy.gov/cmei/greet>
12. ICCT. Life Cycle Assessment of Electric Vehicles. URL: <https://theicct.org/publication/electric-cars-life-cycle-analysis-emissions-europe-jul25/>
13. Argonne National Laboratory. GREET model. URL: <https://www.energy.gov/cmei/greet>
14. ICCT. Why electric vehicles are already much greener than combustion engine vehicles. URL: <https://theicct.org/why-evs-are-already-much-greener-than-combustion-engine-vehicles-jul25/>

REFERENCES:

1. International Energy Agency. (2024). Global EV Outlook. <https://www.iea.org/energy-system>
2. Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., & Pasaoglu, G. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.002>
3. U.S. Geological Survey. (2023). Mineral Commodity Summaries: Lithium, Cobalt, Nickel. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>
4. Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact. *Science of the Total Environment*, 639, 1188–1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
5. Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M., & Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11, 4174. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
6. Ellingsen, L. A.-W., Singh, B., Strømman, A. H. (2016). The size and range effect: Life-cycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010>
7. Wang, X., Gaustad, G., Babbitt, C. W. (2014). Targeting high value metals in lithium-ion battery recycling via cathode-directed strategies. *Journal of Cleaner Production*, 64, 345–356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.056>
8. Dunn, J. B., Gaines, L., Sullivan, J., & Wang, M. (2012). Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries. *Environmental Science & Technology*, 46(22), 12704–12712. <https://doi.org/10.1021/es302420z>
9. International Energy Agency (IEA). (2025) Global Critical Minerals Outlook / Global EV Outlook <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>
10. Geographical distribution of lithium, cobalt, nickel, and graphite production in 2021. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/Geographical-distribution-of-lithium-cobalt-nickel-and-graphite-production-in-2021_fig1_373895747
11. IEA, Argonne National Laboratory GREET Model. Retrieved from <https://www.energy.gov/cmei/greet>
12. ICCT Life Cycle Assessment of Electric Vehicles Retrieved from https://theicct.org/publication/electric-cars-life-cycle-analysis-emissions-europe-jul25/?gad_source=1&gad_campaignid=22639629046&gbraid=0AAAA_pFlef1DD7zgpl7ldYEqlXDAd8ng&gclid=EAlaIqObChMI2pir8YHykgMVOQuiAx0ADywhEAAYASAAEgKo9_D_BwE
13. Argonne National Laboratory (GREET model) Retrieved from <https://www.energy.gov/cmei/greet>
14. Why electric vehicles are already much greener than combustion engine vehicles. ICCT The international council on clean transportation. Retrieved from <https://theicct.org/why-evs-are-already-much-greener-than-combustion-engine-vehicles-jul25/>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 09.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 556.3:504.4.054

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-2>

ГІДРОХІМІЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ВОД РІЧКИ ДНІПРО В РАЙОНІ СКИДУ ПІДЗЕМНИХ І ПОВЕРХНЕВИХ СТОКІВ

Максимова Наталія Миколаївна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-1684-7479

Петрушина Галина Олександрівна,

кандидат хімічних наук, доцент,

доцент кафедри хімії

Дніпровського державного аграрно-економічного університету

ORCID ID: 0000-0001-5508-5193

Базель Ярослав Рудольфович,

доктор хімічних наук, професор,

професор кафедри аналітичної хімії

Ужгородського національного університету;

професор інституту хімічних наук

Університету Павла Йозефа Шафаріка, м. Кошице, Словачька Республіка

ORCID ID: 0000-0002-0745-3075

У роботі здійснено оцінку якості поверхневих вод р. Дніпро в районі скиду стоків з дренажного колектора житлового масиву м. Дніпро. Актуальність дослідження зумовлена регулярним надходженням специфічних забруднювачів, а саме аніонних (АПАР) та неіоногенних (НПАР) поверхнево-активних речовин, у складі дренажних стоків урбанізованих територій, а також необхідністю оцінки їх впливу на стан водних об'єктів у межах великих промислових міст. Вибір проб води проводили з дренажного колектора та у р. Дніпро, вище точки скиду. Лабораторні дослідження виконано у сертифікованій науково-дослідній лабораторії гідроекології із застосуванням стандартизованих методів: гравіметричного, титриметричного, потенціометричного, спектрофотометричного та інших. Встановлено, що більшість досліджених показників, а саме сухий залишок, жорсткість, хлориди, катіони натрію, лужність, водневий показник, у воді з колектора перевищують фонові значення річки, проте не виходять за межі нормативних вимог, що відповідає типовому хімічному складу підземних вод. Критичними є показники вмісту ПАР: концентрація АПАР у воді колектора наближається до ГДК, тоді як вміст НПАР перевищує допустиме значення більш ніж у 50 разів у воді колектора та більш ніж у 30 разів – у річковій воді, що свідчить про активне забруднення водного об'єкта. Отримані результати підтверджують необхідність модернізації систем водовідведення поверхневого та підземного стоку з територій щільної міської забудови і відповідають пріоритетам державної екологічної політики України у сфері охорони водних ресурсів.

Ключові слова: поверхнево-активні речовини, аніонні поверхнево-активні речовини, неіоногенні поверхнево-активні речовини, дренажний колектор, річка Дніпро, якість поверхневих вод, урбанізована територія, моніторинг водних ресурсів.

Maksymova Nataliia, Petrushyna Halyna, Basel Yaroslav. Hydrochemical assessment of the water quality of the River Dnieper in the area where underground and surface water discharge

This study assesses the quality of surface water in the River Dnipro in the vicinity of the discharge point from the drainage collector serving a residential area in the Dnipro City. The relevance of the study stems from the regular influx of specific pollutants, namely anionic and non-ionic surfactants, in the drainage effluent from urbanised areas, as well as the need to assess their impact on the condition of water bodies within large industrial cities. Water samples were collected from the drainage collector and from the River Dnipro, upstream of the discharge point. Laboratory analyses were carried out in a certified hydroecological research laboratory using standardised methods: gravimetric, titrimetric, potentiometric, spectrophotometric and others. It was established that most of the parameters studied, namely dry residue, water hardness, chlorides, sodium cations, alkalinity, and pH, in the water from the collector exceed the river's background values, but do not exceed regulatory limits, which corresponds to the typical chemical composition of groundwater. The levels of surfactants are of critical concern: the concentration of anionic surface-active substances in the collector water is approaching the maximum permissible concentration,

whilst the concentration of non-ionic surfactants exceeds the permissible limit by more than 50 times in the collector water and by more than 30 times in the river water, indicating active pollution of the water body. The results obtained confirm the need to modernise surface and groundwater drainage systems in densely built-up urban areas and are in line with the priorities of Ukraine's state environmental policy in the field of water resources protection.

Key words: *surfactants, anionic surface-active substances, non-ionic surface-active substances, drainage collector, Dnipro River, surface water quality, urbanised area, water resources monitoring.*

Вступ. Стан водних об'єктів у межах урбанізованих територій залишається актуальною науково-практичною задачею, на розв'язання якої покликана, у тому числі, Державна цільова екологічна програма технічної модернізації підприємств водовідведення та очищення стічних вод на період до 2034 р. [1]. Метою Державної програми є покращення якості води водних об'єктів шляхом зменшення обсягів скидання неочищених стічних вод і технічної модернізації підприємств, що є складовою виконання євроінтеграційних зобов'язань та досягнення Цілі сталого розвитку № 6 «Чиста вода та належна санітарія» [1-2].

Проблема погіршення якості водних ресурсів безпосередньо пов'язана з інтенсивним розвитком урбанізації [3]. Аналіз досліджень басейну Південного Бугу [4] виявив кумулятивний ефект забруднення переважно промислового походження, що знижує якість води, погіршує стан екосистем і потребує постійного моніторингу та впровадження сучасних технологій очищення.

За результатами досліджень впливу очищених стічних вод на річку Крка, Словенія, автори [5] виявили, що очищені промислові стоки містили велику кількість органічних забруднень, які майже не піддавалися біологічному розкладанню, органічного азоту, аміаку та фосфору, а іноді й цинку. Загальний вплив скидів очищених промислових та муніципальних стічних вод обумовив створення сприятливих умов для розвитку евтрофікації р. Крка.

Схожі закономірності характерні й для р. Дніпро, яка зазнає впливу зливових і каналізаційних стічних вод у межах значних за площею урбанізованих водозборів [3, 6].

Про негативний вплив урбанізації на якість ґрунтових вод на прикладі Ченнаї, Індія, писали автори [7]. На теперішній час м. Ченнаї відчуває широкий спектр екологічних проблем, включаючи забруднення підземних вод і наслідки їх виснаження, що обумовлено, зокрема, стрімкою втратою озеленення населеного пункту.

В межах населеного пункту на Черкащині також відмічається незадовільний стан підземних вод, що було виявлено на підставі моніторингу складу і властивостей колодязної води [8].

Автори [9] проаналізувавши якість води річки Інд, Пакистан, та виявили, що відповідальними

факторами впливу на варіації якості води в регіоні є забруднення антропогенного походження, поверхневий стік, обумовлений випадінням атмосферних опадів, та ерозія ґрунту.

Хоча в умовах недостатнього водозабезпечення територій існує доволі поширена практика збору дощової води, що відображається на відповідній державній політиці, наприклад в Австралії, Індії, США, та розробці законодавчих вимог на місцевому, державному та національному рівнях щодо регулювання збору дощової води [10].

Слід зауважити, що якісний склад і властивості поверхневих вод характеризується мінливістю. Наприклад, дослідники [11] на підставі аналізу просторово-часових тенденцій якості води на ділянці річки Бхагіраті-Хуглі, Західна Бенгалія, Індія, виявили що якість води в сільській місцевості була кращою, ніж з промисловою і міською забудовою, а також показує, що якість води була кращою протягом періоду після мусону, ніж до мусону.

Інтенсивна забудова міських територій, розвиток промисловості та побутової інфраструктури зумовлюють формування специфічних джерел забруднення поверхневих вод, зокрема, дренажних колекторів, які здебільшого потребують відновлення технічного стану та не передбачають систем очищення стоків, а отже, через які забруднюючі речовини потрапляють безпосередньо у водні об'єкти. Тому набуває доцільності на прикладі дренажного колектору, який прокладено в умовах щільної забудови, проаналізувати якісний склад вод, що скидаються безпосередньо у р. Дніпро в межах населеного пункту задля надання характеристики техногенного впливу.

Особливо небезпечними є скиди забруднених зливових і каналізаційних стічних вод населених пунктів, що призводять до порушення екологічної рівноваги та самоочисної здатності гідроекосистем [3]. Поверхневі стічні води з територій забудови, житлових масивів і доріг, що утворюються, здебільшого, внаслідок випадання опадів, таненні снігу та проведення поливально-мийних робіт, характеризуються неоднорідним хімічним складом забруднюючих речовин. Проблема забруднення річок посилюється відсутністю ефективної системи

управління зливовими водами та незадовільною якістю очищення стічних вод через значний знос міських очисних споруд тощо [3].

За даними Національної доповіді про стан навколишнього середовища в Україні за 2021 р., найбільшими забруднювачами водних об'єктів стали підприємства виду економічної діяльності «Водопостачання; каналізація, поводження з відходами» (секція Е), якими було скинуто 381 млн м³ забруднених стічних вод [12]. У складі цих скидів вміст синтетичних поверхнево-активних речовин (СПАР) становив 165 595,8 кг, тоді як загальний обсяг по Україні – 176 579,3 кг [12].

За даними Регіонального офісу водних ресурсів у Дніпропетровській області скидання СПАР із зворотними водами у поверхневі водні об'єкти становило: 0,015888 тис. т у 2022 р., 0,019924 тис. т у 2023 р. та 0,019528 тис. т у 2024 р. [13], що свідчить про стійку тенденцію надходження цих речовин у водні об'єкти регіону, до яких належить і р. Дніпро в межах однойменного міста.

Правове регулювання у сфері охорони водних об'єктів від забруднення стічними водами зазнає суттєвих змін у контексті євроінтеграції України. Директива Ради 91/271/ЄЕС «Про очистку міських стічних вод» від 21 травня 1991 р. – до недавнього часу основний регулятивний документ у цій сфері – припиняє дію, і їй на заміну прийшла Директива (ЄС) 2024/3019 Європейського Парламенту і Ради від 27 листопада 2024 р. [1-2, 14-15]. Реалізація Директиви (ЄС) 2024/3019 передбачає зменшення антропогенного навантаження на водні об'єкти, модернізацію інфраструктури водовідведення, запровадження європейських стандартів очищення стічних вод і впровадження систем безпечного повторного використання очищеної води та осадів тощо [1-2, 15].

Нормативи гранично допустимих скидів (ГДС) забруднюючих речовин встановлюються з метою поетапного досягнення екологічного нормативу якості води водних об'єктів – науково обґрунтованих значень концентрацій забруднювальних речовин і показників якості води (загальнофізичних, біологічних, хімічних, радіаційних) та санітарно-гігієнічних норм у місцях розташування джерел водопостачання й водокористування, для забезпечення екологічної безпеки людини та водних екосистем, досягнення і підтримання «доброго» екологічного та хімічного стану поверхневих водних мас [16].

Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів встановлені відповідно до категорій водокористування [17]. До другої категорії, зокрема, належить використання водних

об'єктів для господарсько-побутових, оздоровчих, рекреаційних і спортивних цілей, а також водні об'єкти в межах населених пунктів. Вимоги другої категорії поширюються на всі частини водних об'єктів у межах населених пунктів, тому р. Дніпро на ділянці м. Дніпро підпадає під ці вимоги у повному обсязі [17]. Водночас наявний перелік нормованих показників не охоплює всіх речовин, які потрапляють зі стоками і можуть становити небезпеку для екосистем та здоров'я людини [17].

На прогалини у визначенні здатності до біологічного розкладання ПАР і занепокоєння щодо потенційної токсичності стійких метаболітів наголошується в регламентуючих документах, зокрема в Регламенті (ЄС) № 648/2004 «Про миючі засоби» [18]. Суттєві надходження різновидів ПАР у природні поверхневі та підземні води обумовлюють доцільність їх розгляду як специфічних синтетичних забруднюючих речовин – стійких до розкладання, токсичних, здатних до акумуляції. Зважаючи на ці властивості, ПАР можуть розглядатись як складові переліку забруднюючих речовин для визначення хімічного стану масивів поверхневих і підземних вод [11].

Метою роботи є оцінка якості поверхневих вод р. Дніпро в районі скиду стоків підземних вод.

Матеріали та метод. Відбір проб води проводили з колектора, який виходить у р. Дніпро в районі житлового масиву міста, та у р. Дніпро на 20 м вище виходу колектора відповідно до ДСТУ EN ISO 5667-1:2023 (рис. 1).

Визначення концентрацій показників вод проводили у сертифікованій Науково-дослідній лабораторії гідроекології Дніпровського державного аграрно-економічного університету.

Визначення сухого залишку проводили гравіметричним методом за МВВ 081/12-0109-03. У попередньо зваженому порцеляновому посуді випарювали 100 мл досліджуваної води, висушували при температурі 105 °С до постійної маси.

З використанням титриметричного методу проводили визначення карбонатів (за ДСТУ ISO 9963-2:2007), хлоридів (за МВВ 081/12-0004-01), загальної та часткової лужності (за ДСТУ ISO 9963-1:2007), загальної жорсткості води (за ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості», ДСТУ ISO 6059:2003 «Якість води. Визначання сумарного вмісту кальцію та магнію. Титриметричний метод із застосуванням етилендіамінтетраоцтової кислоти»).

Вміст карбонатів, загальну та часткову лужність визначали шляхом титрування проби води розчином кислоти з використанням

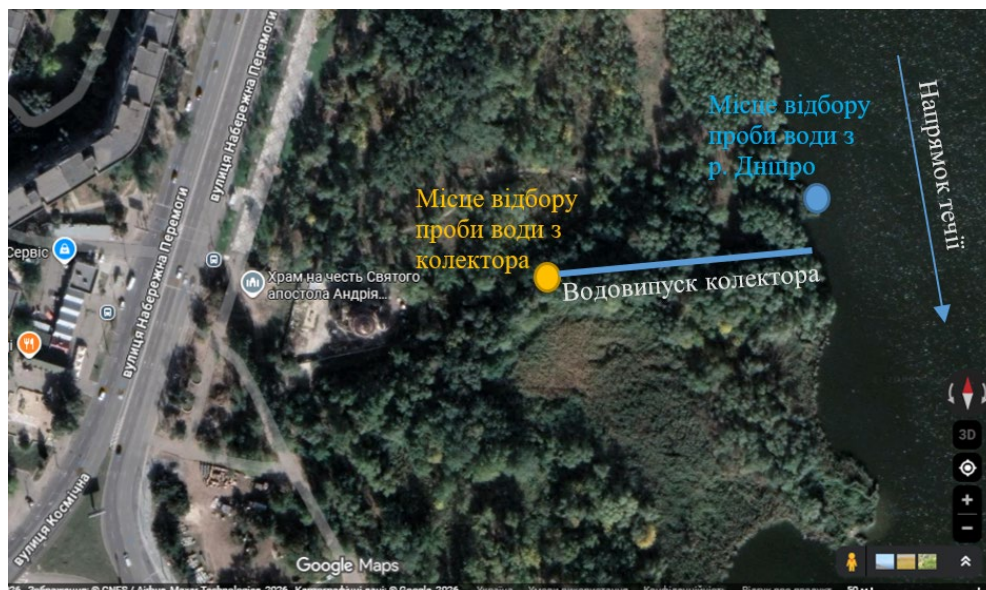


Рис. 1. Місце розташування відбору проб води для аналізу

індикаторів фенолфталеїну (часткова лужність, карбонати) та метилового оранжевого (загальна лужність).

Вміст хлоридів визначали арґентометричним титруванням за методом Мора. Загальну жорсткість визначали методом комплексонометричного титрування при pH 10 у присутності індикатора еріохрома чорного.

АПАР визначали за ДСТУ ISO 7875-1 «Визначення аніонних ПАР методом метиленового синього». НПАР визначали згідно ДСТУ ISO 7875-2 «Визначення неіоногенних ПАР із використанням реактиву Драгендорфа».

Водневий показник та вміст катіонів натрію визначали методом прямої потенціометрії на рН-метрі-мільвольтметрі рН-150МА з використанням скляного (для визначення рН) та натрій-селективного індикаторних електродів. Як електрод порівняння використали хлоридсрібний електрод. Зважування проводили на вагах електронних XAS-220/С клас точності – 2, значення оптичної густини вимірювали на спектрофотометрі UNIKO UV2100.

Результати та дискусії. Сухий залишок є характеристикою загальної кількості розчинених у воді органічних і неорганічних речовин. Зазвичай цей параметр використовується для визначення загальної мінералізації води, яка зумовлена в основному природними чинниками, такими як геологічні умови району походження вод та рівень розчинності мінералів порід. Жорсткість води обумовлена наявністю розчинених солей кальцію та магнію. Основним джерелом надходження у воду катіонів натрію, магнію та кальцію, карбонатів

і хлоридів є розчинення мінералів. Високий вміст цих іонів у воді обумовлений антропогенним впливом.

Вміст розчинених речовин у воді стоків підземних вод (878,6 мг/л) є майже вдвічі більшим, ніж у воді р. Дніпро (398,7 мг/л). Жорсткість загальна майже вдвічі є більшою у зразках води, відібраних з колектора (7,57 мг-екв/л), у порівнянні з річковою водою (4,04 мг-екв/л), проте цей показник не перевищує допустиме значення. Також вміст хлоридів у воді колектора (113,6 мг/л) в 4 рази більший, ніж у річковій воді (26,8 мг/л), а катіонів натрію – більше майже у 6 разів (17,2 та 97,2 мг/л для вод р. Дніпро та колектора відповідно). На відміну від цих двох показників, вміст карбонатів у даних зразках практично не відрізняється (244,0 та 292,8 мг/л для вод р. Дніпро та колектора відповідно). Знайдені значення вище вказаних показників, відповідають вимогам, що висуваються для вод питного призначення [17, 20]. Достатньо великий вміст неорганічних солей є характерним для підземних вод та не вказує на відхилення від санітарних норм.

Характеристиками середовища водних об'єктів є водневий показник та лужність. Водневий показник, що визначається як від'ємний десятиковий логарифм концентрації іонів гідрогену H^+ , для вод річки Дніпро та колектора становить 8,46 та 8,02 відповідно. Лужність води – це здатність розчинених у ній речовин нейтралізувати кислоти. Загальна лужність зумовлена вмістом гідрогенкарбонатів, карбонатів та гідроксидів, для річкової води мала значення 3,8 ммоль-екв/л, а для води з колектора

є майже вдвічі більшою – 6,0 ммоль-екв/л. Часткова лужність фіксує гідроксид-іони та половину карбонатів. Для досліджуваних вод р. Дніпро та колектора становила 0,32 та 0,16 ммоль-екв/л відповідно. Така розбіжність у частковій та загальній лужності досліджуваних вод може бути обумовлена великим вмістом гідрогенкарбонатів у воді з колектора, значна частина якої потрапляє з підземних джерел. Знайдені значення водневого показника, загальної та часткової лужності не перевищують нормативні та рекомендовані для вод питного призначення [17; 20].

Поверхнево-активні речовини мають властивість зменшувати поверхневий натяг внаслідок адсорбції на поверхні розділів фаз (наприклад, рідини та газу). ПАР широко використовується у складі побутових та промислових миючих засобів. На відміну від природних миючих засобів (мила), які у присутності солей кальцію, магнію та деяких інших металів утворюють малорозчинні сполуки, ПАР виявляють миючі властивості і у жорсткій воді. Основний спосіб потрапляння ПАР у природні водойми – надходження із стічними водами господарсько-побутовими, промисловими, пралень та автомийок, із змивами від сільгоспугідь. Саме в стічних водах від процесів прання і миття різних виробів, пралень, автомийок спостерігаються найбільші концентрації ПАР. Зазвичай ці стічні води містять аніоноактивні і неіоногенні поверхнево-активні речовини, які практично не розкладаються у природних водах [17]. Аніоноактивні ПАР, які представлені переважно солями сульфокислот та сірчаноокислих ефірів, у воді утворюють негативно заряджені іони. Неіоногенні ПАР у водному розчині не дисоціюють на іони. Зазвичай НПАР відносяться до числа важко-руйнівних у довкілля сполук, які можуть накопичуватися в об'єктах довкілля.

ПАР, потрапляючи у річки, знижують поверхневий натяг води та утворюють стійку плівку та піну на її поверхні. Внаслідок цього гірше розчиняється кисень та сповільнюється обмін газів між водою і повітрям. Це може призвести до гіпоксії і загибелі риб і безхребетних, виникнення дисбалансу біомаси водоростей. Деякі НПАР можуть впливати на ендокринну систему риб, зменшуючи їх популяцію, а також здатні до акумуляції у рибках, молюсках, донних організмах. ПАР зменшують здатність річки до самоочищення внаслідок пригнічення бактерій та зміни мікробних спільнот [21]. Крім того, ПАР мають властивість розчиняти гідрофобні речовини і завдяки цьому переносити нафтопродукти,

пестициди, важкі метали [22]. Це підвищує токсичність води та збільшує мобільність забруднювачів [23].

Згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10 та Гігієнічними нормативами якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення, затвердженими наказом Міністерства охорони здоров'я України від 02.05.2022 № 721, гранично допустимі значення для АПАР та НПАР становлять 0,5 та 0,1 мг/л відповідно [17; 20], при цьому для НПАР ГДК прийнято як для неіонолу АФ-14 та інших його аналогів. За результатами аналізу кількість АПАР у річковій воді становить 0,12 а у воді колектора – 0,48 мг/л. Кількість НПАР – 3,2 та 5,6 мг/л для річкової води та води з колектора відповідно (рис. 2).

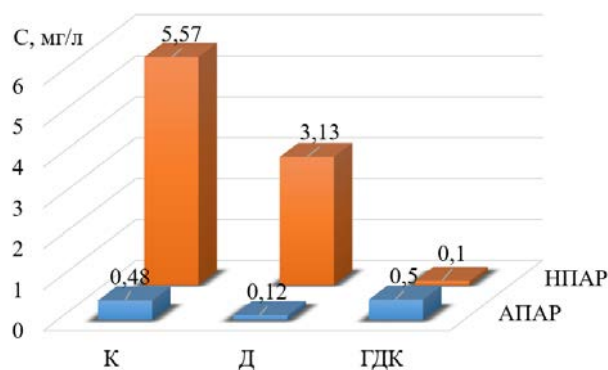


Рис. 2. Вміст АПАР та НПАР у водах колектора (К) та р. Дніпро (Д)

Висновки. Вміст АПАР у воді колектора знаходиться на межі із ГДК, у той час як вміст НПАР перевищує допустиме значення більше ніж у 50 разів. Річкова вода має у межах норми вміст АПАР, проте вміст НПАР перевищує ГДК більше ніж у 30 разів. Це свідчить про забруднення річкової води АПАР та НПАР у місці зливу. Підвищений вміст ПАР у воді колектора свідчить про несанкційне скидання стічних вод від приватного або промислового сектора.

Інші показники (сухий залишок, рН, кислотність лужна та загальна, карбонати, хлориди, натрій) досліджуваних вод не перевищували нормативів, проте значення цих показників у воді колектору суттєво перевищують відповідних значень річкової води.

Результати польових та лабораторних досліджень свідчать про актуальність питань модернізації систем водовідведення поверхневого та підземного стоків з територій щільної забудови, що розглянуто на прикладі великого промислового міста та відповідає сучасній змістовній спрямованості державної екологічної політики.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Про затвердження Державної цільової екологічної програми технічної модернізації підприємств водовідведення та очищення стічних вод, що перебувають у державній або комунальній власності, на період до 2034 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 24 грудня 2025 р. № 1502-р. Верховна Рада України : офіційний веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1502-2025-%D1%80#Text> (дата звернення: 15.04.2026).
2. Модернізація систем водовідведення та очищення стічних вод: затверджено Державну цільову програму до 2034 року. Новини від 26.12.2025. Міністерство розвитку громад та територій України : офіційний веб-сайт. URL: <https://mindev.gov.ua/news/modernizatsiia-system-vodovidvedennia-ta-ochyshchennia-stichnykh-vod-zatverdzheno-derzhavnu-tsilovu-prohramu-do-2034-roku> (дата звернення: 15.04.2026).
3. Скок С. В. Вплив зливових та каналізаційних стічних вод на якість річки Дніпро в зоні дії Херсонської урбосистеми. *Вісник Уманського національного університету садівництва*. 2020. №2, С. 122-129. DOI: <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2020-2-122-129>.
4. Залізник Я. І., Шевченко Н. О., Балабак А. В. Техноекоекологічний аналіз впливу промислових об'єктів на річкові екосистеми. *Вісник Уманського національного університету садівництва*. 2025. №2, С. 68-73. DOI: <https://doi.org/10.32782/2310-0478-2025-2-69-73>.
5. Cotman M., Zagorc-Koncan J., Droic A. Study of impacts of treated wastewater to the Krka river, Slovenia. *Water Science & Technol.* 2001. 44 (6), 47–54. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0337>
6. Пічура В. І., Шахман І. О., Бистрянцева А. М. Просторово-часова закономірність формування якості води в річці Дніпро. *Біоресурси і природокористування*. 2018. Том 10, №1-2, С. 44–57. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/view/10281/9061> (дата звернення: 15.04.2026).
7. Arunprakash M., Giridharan L., Krishnamurthy R. R., Jayaprakash M. Impact of urbanisation in groundwater of South Chennai City, Tamil Nadu, India. *Environmental Earth Sciences*. 2014. 71, 947–957. URL: https://www.researchgate.net/profile/Muthumanickam-Jayaprakash/publication/257794720_Impact_of_urbanization_in_groundwater_of_south-Chennai-City-Tamil_Nadu_India/links/54accebc0cf2479c2ee8542d/Impact-of-urbanization-in-groundwater-of-south-Chennai-City-T (дата звернення: 15.04.2026).
8. Олексієнко О. Ю., Попова В. В. Оцінка якості питних вод з різних джерел водопостачання. *Технології та інжиніринг*. 2021. (5), С. 37–47. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.5.4>.
9. Baluch M. A., Hashmi H. N. Investigating the impact of anthropogenic and natural sources of pollution on quality of water in Upper Indus Basin (UIB) by using multivariate statistical analysis. *J Chem.* 2019 (3), 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4307251>.
10. Holland-Stergar B. The law and policy of rainwater harvesting: A comparative analysis of Australia, India, and the United States. *UCLA Journal of Environmental Law and Policy*. 2018. 36(1), 127–165. URL: <https://scholar.google.com/scholar?&q=Holland-Stergar%2C%20B.%20%282018%29.%20The%20law%20and%20policy%20of%20rainwater%20harvesting%3A%20A%20comparative%20analysis%20of%20Australia%2C%20India%2C%20and%20the%20United%20States.%20UCLA%20Journal%20of%20Env> (дата звернення: 15.04.2026).
11. Das S., Sarkar R. Monitoring and evaluating the spatiotemporal variations of the water quality of a stretch of the Bhagirathi-Hugli River, West Bengal, India, using geospatial technology and integrated statistical methods. *Environ Sci Pollut Res.* 2021. 28, 15853–15869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11655-6>.
12. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України : офіційний веб-сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-prirodno-seredovyshha-v-ukrayini/> (дата звернення: 15.04.2026).
13. Екологічний паспорт Дніпропетровської області за 2024 рік. Департамент екології та природних ресурсів облвійськадміністрації, 2025. 298 с. Дніпропетровська обласна військова адміністрація : офіційний веб-сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-prirodno-seredovyshha-v-ukrayini/> (дата звернення: 15.04.2026).
14. Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. OJ L 135, 30.5.1991, pp. 40–52. Current consolidated version: 01/01/2014. ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/1991/271/oj>.
15. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast) (Text with EEA relevance). PE/85/2024/REV/1. OJ L, 2024/3019, 12.12.2024, ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj>.
16. Про затвердження Порядку розроблення нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти та перелік забруднюючих речовин, скидання яких у водні об'єкти нормується : Постанова Кабінету Міністрів України від 11.09.1996 р. № 1100. Редакція від 16.12.2025. Верховна Рада України : офіційний веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1100-96-%D0%BF#Text> (дата звернення: 15.04.2026).
17. Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 02.05.2022 № 721. Оновлення: 03.12.2024. Верховна Рада України : офіційний веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (дата звернення: 15.04.2026).
18. Регламент (ЄС) № 648/2004 Європейського Парламенту та Ради "Про миючі засоби" від 31 березня 2004 року. Верховна Рада України : офіційний веб-сайт. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_961#Text (дата звернення: 15.04.2026).

19. Про затвердження Переліку забруднюючих речовин для визначення хімічного стану масивів поверхневих і підземних вод та екологічного потенціалу штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод : наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 06.02.2017 № 45. Верховна Рада України : офіційний веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0235-17#n13> (дата звернення: 15.04.2026).

20. Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10) : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 12.05.2010 № 400. Оновлення від 17.01.2025. Верховна Рада України : офіційний веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 15.04.2026).

21. Badmus S. O., Amusa H. K., Oyehan T. A., Saleh T. A. Environmental risks and toxicity of surfactants: overview of analysis, assessment, and remediation techniques. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2021, 28(44). 62085–62104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16483-w>.

22. Najim A. A., Radeef A. Y. Surfactants: hygiene's first line of defence against pollution Available to Purchase. *Journal of Environmental Engineering and Science*, (2024), 19 (3). 157–176. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenes.23.00095>.

23. Малько А. Поверхнево-активні речовини, як компонент антропогенного навантаження на довкілля. *Наука і техніка сьогодні*. 2023, 8 (22). С. 383-395. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-8\(22\)-383-395](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-8(22)-383-395).

REFERENCES:

1. Pro zatverdzhennia Derzhavnoi tsilovoi ekolohichnoi prohramy tekhnichnoi modernizatsii pidpriemstv vodovidvedennia ta ochyshchennia stichnykh vod, shcho perebuvauiut u derzhavnii abo komunalnii vlasnosti, na period do 2034 roku : Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 24.12.2025 № 1502-r. [On the Approval of the State Targeted Environmental Programme for the Technical Modernisation of State- or Municipally-Owned Wastewater Collection and Treatment Facilities for the Period up to 2034]. Verkhovna Rada of Ukraine : official website. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1502-2025-%D1%80#Text>. [in Ukrainian].

2. Modernizatsiia system vodovidvedennia ta ochyshchennia stichnykh vod: zatverdzheno Derzhavnu tsilovu prohramu do 2034 roku. [Modernisation of drainage and wastewater treatment systems: State Target Programme approved until 2034]. Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine : official website. Retrieved from: <https://mindev.gov.ua/news/modernizatsiia-system-vodovidvedennia-ta-ochyshchennia-stichnykh-vod-zatverdzheno-derzhavnu-tsilovu-prohramu-do-2034-roku>. [in Ukrainian].

3. Skok, S. V. (2020) Vplyv zlyvovykh ta kanalizatsiinykh stichnykh vod na yakist richky Dnipro v zoni dii Khersonskoi urbosystemy. [The impact of stormwater and sewage on the water quality of the Dnieper River within the catchment area of the Kherson urban system]. *Visnyk Umanskooho natsionalnoho universytetu sadivnytstva*. №2, 122-129. DOI: <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2020-2-122-129>. [in Ukrainian].

4. Zalizniak, Ya. I., Shevchenko, N. O., & Balabak, A. V. (2025) Tekhnoekolohichniy analiz vplyvu promyslovykh ob'ektiv na richkovi ekosystemy. [A techno-ecological analysis of the impact of industrial facilities on river ecosystems]. *Bulletin of Uman National University of Horticulture*. 2025. №2, С. 68-73. DOI: <https://doi.org/10.32782/2310-0478-2025-2-69-73>. [in Ukrainian].

5. Cotman, M., Zagorc-Koncan, J., & Droic, A. (2001) Study of impacts of treated wastewater to the Krka river, Slovenia. *Water Science & Technol.* 44 (6), 47–54. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0337>.

6. Pichura, V. I., Shakhman, I. O., & Bystrantseva, A. M. (2018) Prostorovo-chasova zakonomirnist formuvannia yakosti vody v richtsi Dnipro. [Spatio-temporal patterns in the formation of water quality in the Dnieper River]. *Bioresursy i pryrodokorystuvannia*. 2018. 10, №1-2, 44–57. Retrieved from: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/view/10281/9061>. [in Ukrainian].

7. Arunprakash, M., Giridharan, L., Krishnamurthy, R. R., & Jayaprakash, M. (2014). Impact of urbanisation in groundwater of South Chennai City, Tamil Nadu, India. *Environmental Earth Sciences*, 71, 947–957. Retrieved from: https://www.researchgate.net/profile/Muthumanickam-Jayaprakash/publication/257794720_Impact_of_urbanization_in_groundwater_of_south_Chennai_Tamil_Nadu_India/links/54accebc0cf2479c2ee8542d/Impact-of-urbanization-in-groundwater-of-south-Chennai-City-T.

8. Oleksiienko, O. Yu., & Popova, V. V. (2021) Otsinka yakosti pytnykh vod z riznykh dzherel vodopostachannia. [Assessment of drinking water quality from various water supply sources]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh*. (5), 37–47. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.5.4>. [in Ukrainian].

9. Baluch, M. A., & Hashmi, H. N. (2019) Investigating the impact of anthropogenic and natural sources of pollution on quality of water in Upper Indus Basin (UIB) by using multivariate statistical analysis. *J Chem.* (3), 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4307251>.

10. Holland-Stergar, B. (2018) The law and policy of rainwater harvesting: A comparative analysis of Australia, India, and the United States. *UCLA Journal of Environmental Law and Policy*. 36(1), 127–165. Retrieved from: <https://scholar.google.com/scholar?q=Holland-Stergar%2C%20B.%20%282018%29.%20The%20law%20and%20policy%20of%20rainwater%20harvesting%3A%20A%20comparative%20analysis%20of%20Australia%2C%20India%2C%20and%20the%20United%20States.%20UCLA%20Journal%20of%20Env>

11. Das, S., & Sarkar, R. (2021) Monitoring and evaluating the spatiotemporal variations of the water quality of a stretch of the Bhagirathi-Hugli River, West Bengal, India, using geospatial technology and integrated statistical methods. *Environ Sci Pollut Res*. 28, 15853–15869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11655-6>.

12. Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Ukraini u 2021 rotsi. [National Report on the State of the Environment in Ukraine in 2021]. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine: official website. Retrieved from: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovidi-pro-stand-navkolyshnogo-pryrodnoho-seredovyscha-v-ukrayini/>. [in Ukrainian].
13. Ekologichnyi pasport Dnipropetrovskoi oblasti za 2024 rik. [Environmental Report for Dnipropetrovsk Oblast for 2024.]. Departament ekolohii ta pryrodnykh resursiv oblyiskadministratsii, 2025. 298 p. Dnipropetrovsk Regional Military Administration: official website. Retrieved from: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovidi-pro-stand-navkolyshnogo-pryrodnoho-seredovyscha-v-ukrayini/>. [in Ukrainian].
14. Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. OJ L 135, 30.5.1991, pp. 40–52. Current consolidated version: 01/01/2014. ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/1991/271/oj>.
15. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast) (Text with EEA relevance). PE/85/2024/REV/1. OJ L, 2024/3019, 12.12.2024, ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj>.
16. On the Approval of the Procedure for Establishing Maximum Permissible Discharge Standards for Pollutants into Water Bodies and the List of Pollutants Whose Discharge into Water Bodies is Regulated: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1100 of 11 September 1996. [On the Approval of the Procedure for Establishing Maximum Permissible Discharge Standards for Pollutants into Water Bodies and the List of Pollutants Whose Discharge into Water Bodies is Regulated] Revised on 16 December 2025. Verkhovna Rada of Ukraine : official website. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1100-96-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian].
17. Pro zatverdzhennia Hihienichnykh normatyviv yakosti vody vodnykh ob'ektiv dlia zadovolennia pytnykh, hospodarsko-pobutovykh ta inshykh potreb naselennia : Nakaz Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy vid 02.05.2022 № 721. [On the Approval of Hygienic Standards for the Quality of Water in Water Bodies for Drinking, Domestic and Other Needs of the Population]. Onovlennia: 03.12.2024. Verkhovna Rada of Ukraine : official website. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text>. [in Ukrainian].
18. Rehlament (leS) № 648/2004 Yevropeiskoho Parlamentu ta Rady "Pro myiuchi zasoby" vid 31.03.2004. [Regulation (EC) No 648/2004 of the European Parliament and of the Council on detergents of 31.03.2004]. Verkhovna Rada of Ukraine : official website. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_961#Text. [in Ukrainian].
19. Pro zatverdzhennia Pereliku zabrudniuiuchykh rehovyn dlia vyznachennia khimichnoho stanu masyviv poverkhnevykh i pidzemnykh vod ta ekolohichnoho potentsialu shtuchnoho abo istotno zminenoho masyvu poverkhnevykh vod : nakaz Ministerstva ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy vid 06.02.2017 № 45. [On the Approval of the List of Pollutants for Determining the Chemical Status of Surface Water Bodies and Groundwater Bodies and the Ecological Potential of Artificial or Significantly Modified Surface Water Bodies]. Verkhovna Rada of Ukraine : official website. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0235-17#n13>. [in Ukrainian].
20. Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl "Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoj dlia spozhyvannia liudynoi" (DSanPiN 2.2.4-171-10) : nakaz Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy vid 12.05.2010 № 400. [On the Approval of the State Sanitary Standards and Rules 'Hygiene Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption' (DSanPiN 2.2.4-171-10)]. Onovlennia vid 17.01.2025. Verkhovna Rada of Ukraine : official website. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>. [in Ukrainian].
21. Badmus, S. O., Amusa, H. K., Oyehan, T. A., & Saleh, T. A. (2021) Environmental risks and toxicity of surfactants: overview of analysis, assessment, and remediation techniques. *Environ Sci Pollut Res Int.* 28(44). 62085–62104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16483-w>.
22. Najim, A. A., & Radeef, A. Y. (2024) Surfactants: hygiene's first line of defence against pollution Available to Purchase. *Journal of Environmental Engineering and Science.* 19 (3). 157–176. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenes.23.00095>.
23. Malko, A. (2023) Poverkhnevo-aktyvni rehovyny, yak komponent antropohennoho navantazhennia na dokillia. [Surfactants as a component of anthropogenic pressure on the environment]. *Nauka i tekhnika sohodni.* 8 (22). 383-395. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-8\(22\)-383-395](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-8(22)-383-395). [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 622.83:504.53:528.8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-3>

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗВИТКУ ПРОВАЛЬНИХ ЗОН ШАХТ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА РОСЛИННИЙ ПОКРИВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Петльований Михайло Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої інженерії та освіти

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-8911-4973

Бучавий Юрій Володимирович,

кандидат біологічних наук, доцент,

доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0003-3282-2810

Легеца Юлія Олександрівна,

доктор юридичних наук, професор,

професор кафедри цивільного, господарського та екологічного права

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-4896-3178

Дослідження спрямоване на вивчення просторово-часових змін провальної зони залізорудної шахти та кількісну оцінку її довготривалого деструктивного впливу на рослинний покрив прилеглих територій. В основу методики покладено просторово-часовий аналіз даних дистанційного зондування Землі за період 1941–2025 рр., який включає опрацювання історичної аерофотозйомки, а також сучасних матеріалів супутників Landsat і Sentinel-2. Для оцінки стану фітоценозів у буферних зонах 0–50, 50–100 м та на контрольній ділянці розраховано нормалізований вегетаційний індекс NDVI. Встановлено, що розширення провалу з 7,8 до 38,5 га достовірно описується логарифмічною залежністю та чітко поділяється на дві фази: активну до 1990 р. та стадію затухання. Доведено наявність вираженого просторового градієнта деградації рослинного покриву: у ближній буферній зоні 0–50 м частка щільної фітомаси становить лише 8,8%, а середні показники NDVI за останнє десятиріччя мають стійкий негативний тренд. Визначено, що у фазі затухання геомеханічних процесів просторовий розвиток провалу не зупиняється, а продовжується у вигляді кумулятивного ефекту, формуючи стрес для рослинного покриву прилеглих територій. Рекомендовано розвивати напрям від переходу від низькоефективної засипки провалів пустими породами до застосування технологій монолітного закладання утворених відкритих техногенних пустот на основі відходів збагачення залізних руд для надійного блокування зсувів та консервації порушених земель.

Ключові слова: провальна зона, дистанційне зондування, вегетаційний індекс NDVI, рослинний покрив, деградація земель.

Petlovanyi Mykhailo, Buchavyi Yurii, Leheza Yuliia. Study of the evolution of mine collapse zones and their effect on vegetation cover using remote sensing techniques

The study is aimed at investigating the spatio-temporal evolution of a subsidence zone at an iron ore mine and providing a quantitative assessment of its long-term destructive impact on the vegetation cover of adjacent territories. The methodology is based on a spatio-temporal analysis of remote sensing data for the period 1941–2025, including the processing of historical aerial photographs as well as modern satellite imagery from Landsat and Sentinel-2 missions. To evaluate the condition of phytocoenoses within buffer zones of 0–50 and 50–100 m, as well as at a control site, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated. It was established that the expansion of the subsidence area from 7.8 to 38.5 ha is reliably described by a logarithmic relationship and can be clearly divided into two phases: an active phase until 1990 and a subsequent attenuation stage.

The presence of a pronounced spatial gradient of vegetation degradation has been demonstrated: within the nearest buffer zone (0–50 m), the proportion of dense vegetation cover is only 8.8%, while the mean NDVI values over the past decade exhibit a persistent negative trend. It has been determined that during the attenuation phase of geomechanical processes, the spatial development of the subsidence zone does not cease but continues in the form of a cumulative effect, thereby imposing sustained stress on the vegetation cover of surrounding areas. It is recommended to shift from low-efficiency practices of backfilling subsidence zones with waste rock toward the implementation of monolithic paste backfilling technologies based on iron ore beneficiation tailings, ensuring reliable stabilization of ground movement processes and effective reclamation of disturbed lands.

Key words: subsidence zone, remote sensing, NDVI, land degradation, vegetation cover.

Вступ. Видобуток мінеральних ресурсів має пріоритетне значення для розвитку економік багатьох країн та є основою створення високих технологій, виробництва товарів та надання послуг [1; 2]. Гірничодобувна галузь формує близько 6,9% глобального валового внутрішнього продукту, забезпечуючи людство критично важливими матеріалами [3; 4]. Проте, існує і негативна сторона цього інтенсивного технологічного процесу, що характеризується значним та часто руйнівним, незворотнім впливом на природне навколишнє середовище. При розробці родовищ корисних копалин як відкритим, так і підземним способами безпосередньо найбільшого впливу зазнає верхній шар літосфери [5–7]. Вилучення значних обсягів гірничої маси з надр викликає масштабне порушення геомеханічної рівноваги масиву гірських порід, що призводить до зниження його стійкості та деформацій земної поверхні, а також обумовлює необхідність складування багатотоннажних відходів видобутку та переробки на земній поверхні. Так, внаслідок видобутку мінеральної сировини у світі щорічно вилучається, за деякими оцінками, понад 150 млрд т гірничої маси, з яких виходить близько 60–65 млрд т корисних копалин, при цьому утворюється 72 млрд тонн пустих порід і 13 млрд т хвостів збагачення [8].

Україна сьогодні входить до топ-20 країн світу за площею земель, зайнятих об'єктами гірничодобувної промисловості [9]. Згідно національної доповіді про стан навколишнього середовища [10], видобутком мінеральних ресурсів зайнято понад 52,7 тис. га земельних площ, серед яких найбільшого впливу зазнають Дніпропетровська, Донецька та Житомирська області. Серед усіх гірничодобувних галузей України особливо виразною, з точки зору позитивного економічного та негативного екологічного впливу, є залізорудна. Незважаючи на вагомий прибуток до державного бюджету від експорту продукції гірничо-металургійного комплексу, у найбільш крупному та важливому Криворізькому залізорудному басейні внаслідок масштабного відкритого та підземного видобутку склалась важка техногенно-екологічна ситуація. Особливо гостро сьогодні у Кривбасі постають проблеми значних та руйнівних деформацій земної поверхні, які на відміну від вугільних родовищ характеризуються більш глибокими формами деформацій у вигляді провальних зон та масштабне накопичення на земній поверхні багатотоннажні відходи видобутку та переробки залізної руди, що займають значні площі та чинять забруднення довкілля [11–13].

Сьогодні для превентивної оцінки впливу підземних гірничих робіт на стан земної поверхні пріоритетне значення мають непрямі методи дослідження, зокрема дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) [14; 15]. Використання багатоспектральних супутникових даних дозволяє забезпечити високу періодичність моніторингу та об'єктивність аналізу масштабних територій гірничих відводів та їх впливу на рослинний стан земної поверхні. Значний масив сучасних наукових праць сконцентрований на вивченні деформацій земної поверхні та трансформації верхнього ґрунтово-рослинного шару внаслідок розробки переважно пологих пластових родовищ, а саме вугільних родовищ [16; 17]. У таких умовах основна увага дослідників зосереджена на механізмах формування мультисідання, де зрушення відбуваються порівняно плавно, а також на питаннях моніторингу ефективності подальшої біологічної рекультивації цих земель [18; 19]. Проте, незважаючи на вагомий досягнення поза увагою наукової спільноти залишається аналіз еволюції саме утворених масштабних провальних зон, що характерні для інтенсивного підземного видобутку залізних руд та ймовірну поступову деградацію фітоценозів на прилеглих територіях, що потребує застосування вегетаційних індексів, зокрема NDVI. Представлене дослідження спрямоване на заповнення зазначених наукових прогалин шляхом комплексного вивчення просторово-часової динаміки розвитку провальної зони діючої залізорудної шахти та кількісної оцінки її довготривалого деструктивного впливу на стан рослинного покриву прилеглих буферних територій.

Методи та методики дослідження. У представленому дослідженні просторово-часова динаміка зміни провальної зони залізорудної шахти та її вплив на ґрунтово-рослинний покрив прилеглої території розглядається на прикладі шахти «Козацька» ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат». Географічно підприємство розташоване на західній околиці міста Кривий Ріг і геологічно приурочене до центральної частини Саксаганського рудного району Кривбасу (рис. 1).

Історія підземного видобутку в межах сучасного гірничого відводу шахти бере початок із 1907 року. Упродовж понад століття експлуатація родовища здійснювалася під різними назвами, зокрема шахти «Ходзинська», «Червона Гвардія», Рудоуправління ім. Р. Люксембург, «Гвардійська». Шахта «Козацька» розробляє крутоспадні поклади багатих залізних руд із кутом падіння 54–65° та горизонтальною потужністю від 10 до 30 м. На сьогодні ведення очисних робіт здійснюється на глибинах 1300–1400 м системами підповерхового обвалення руди та

порід, а також камерними системами. Тривалий період інтенсивного відпрацювання рудних тіл без закладання виробленого простору законо-мірно призвів до зсувних процесів і утворення на земній поверхні масштабної провальної зони. Провальна зона має витягнуту форму з наступними параметрами: протяжність за простяганням становить близько 1000 м, розмір навхрест простягання в межах 300–570 м, а глибина досягає 100–120 м. Саме історична еволюція площі цієї провальної зони та оцінка його її впливу на процеси деградації рослинного покриву прилеглих ландшафтів є основним предметом подальшого аналізу.

Динаміка зміни площі провальної зони на земній поверхні є прямим індикатором інтенсивності процесів зрушення у підробленому масиві гірських порід при розробці рудних покладів. Для відтворення еволюції та оцінки масштабів розвитку провальної зони ш. «Козацька» застосовано вдосконалену методику просторово-часового аналізу, що базується на використанні широкого масиву даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) за період 1941–2025 рр. Основну базу дослідження розвитку провальної зони ш. «Козацька» на ранніх етапах склали архівні матеріали німецької аерофоторозвідки (1941–1944 рр.) та декласифіковані знімки американських систем 1960–1980 рр. (місії Corona та Hexagon), отримані з відкритого веб-порталу історичних просторових даних [20]. Моніторинг за період з 1984 року і дотепер здійснювався на основі даних супутникових зображень Landsat 4, 5, 7, 8, 9 через ГІС-платформу Google Earth Pro з використанням інструменту «Історичні знімки». Процедура обробки візуальних даних передбачала оцифрування контурів провальної зони для кожного доступного хронологічного зрізу, що дозволило кількісно зафіксувати приріст площі порушених земель та сформулювати репрезентативний динамічний часовий ряд. Отримані результати просторового аналізу використано для встановлення векторів домінуючого розширення провалів і виявлення їхніх кореляційних зв'язків із гірничо-геологічними чинниками відпрацювання шахтних полів. На заключному етапі виконано математичну апроксимацію емпіричних даних із побудовою графічних залежностей зміни площі в часі, що дозволило оцінити кінетику зрушення масиву гірських порід та спрогнозувати подальший розвиток деформацій земної поверхні.

Територію дослідження, де вивчалась змінність рослинності були прилеглі до провальної зони ш. «Козацька» буферні зони на відстані від її контуру до 50 і до 100 м відповідно, а також

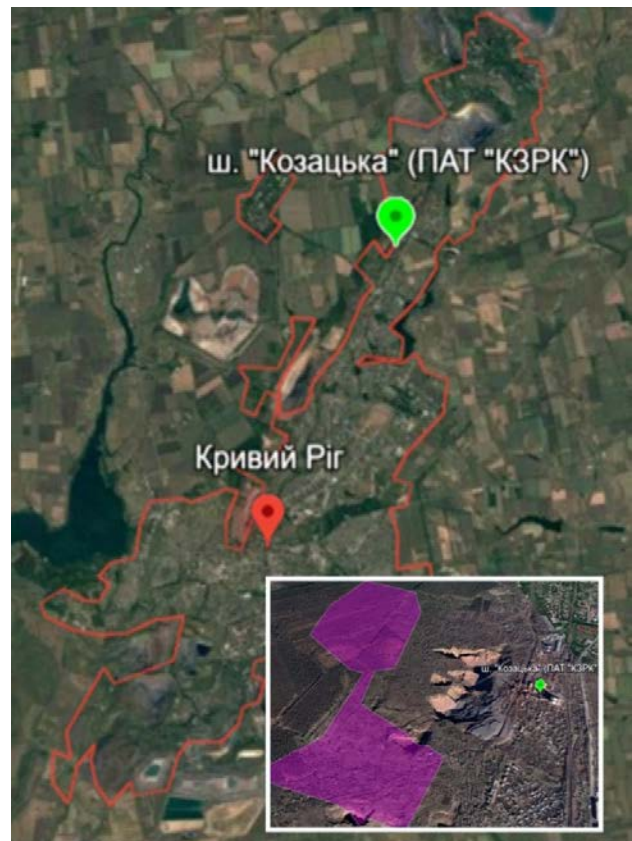


Рис. 1. Геопросторове розташування ш. «Козацька» та досліджуваної утвореної провальної зони

контрольна ділянка лісостепоного ландшафту, без ознак впливу гірничих робіт на відстані 500 м у північно-східному напрямку від основної провальної зони ш. «Козацька». Слід зазначити, якщо при дослідженні динаміки розвитку у просторі й часі приймалась загальна провальна зона ш. «Козацька», то при дослідженні зміни рослинного покриву провальна зона поділена на провал 1 (основний) та провал 2, що виник у 1990 році, адже між ними ще досі зберігається ділянка ґрунтового-рослинного покриву 50 м. На досліджуваній території визначалися характеристики змін рослинності за період 2016–2025 рр. Для оцінки змін характеристик рослинних угруповань на дослідженій території у просторі та часі використовувались технології дистанційного зондування, а саме багатоспектральні аерофотознімки від супутника Sentinel-2, який веде місію з 2015 р. Перевагою використання знімків даного супутника є відносно висока роздільна здатність кольорових та інфрачервоного каналів, необхідних для розрахунку вегетаційних індексів, а також частота зйомки в середньому раз на тиждень і доступний репозиторій архівних аерофотознімків онлайн-ресурсу Copernicus Open Hub Access [21].

Для оцінки характеристик рослинних угруповань використовувався нормалізований вегетаційний індекс NDVI, який ототожнюється із фотосинтетично активною фітомасою та має сьогодні широке застосування через простоту розрахунку й чітку інтерпретацію його значень. Даний індекс розраховується за формулою:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED).$$

де *RED* – значення відбиття від земної поверхні, що надходить на сенсор супутника в червоному діапазоні; *NIR* – відповідно в інфрачервоному діапазоні.

Таким чином, значення NDVI завжди перебуватиме в діапазоні від -1 до 1 та може бути охарактеризовано наступним чином для зонування земної поверхні: NDVI < 0 – водні об'єкти, каміння, забудова тощо; від 0 до 0,3 – відкритий ґрунт; від 0,3 до 0,4 – розріджена або пригнічена рослинність; від 0,4 до 0,5 – нормальна рослинність степового ландшафту; вище за 0,5 – густа рослинність, деревостан тощо. Фізичний сенс цього індексу полягає в тому, що у видимій області спектру (0,4–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин, а в інфрачервоній області (0,7–1,0 мкм) знаходиться область максимального відображення клітинних структур листа. Тобто висока фотосинтетична активність, що пов'язана, як правило, з густою рослинністю веде до меншого відображення у видимій області спектру і більшому в інфрачервоній.

Відбір та аналіз аерофотознімків для аналізу індексу NDVI здійснювався з врахуванням відсутності хмар на відповідний період часу та у піковий період вегетативної активності зелених насаджень, який зазвичай припадає на другу половину червня. Попередня обробка аерофотознімків здійснювалася в програмі SNAP 12 із подальшим експортом вегетаційних індексів та композитних *RGB* зображень до зформованої геоінформаційної системи в програмі

ESRI ArcGIS Desktop 10 для проведення геопросторового аналізу (Spatial Analyst).

Результати дослідження та дискусія.

У результаті комплексної обробки, просторової прив'язки та векторизації масивів даних дистанційного зондування Землі було відтворено еволюційну картину формування зони зрушення над відпрацьованим простором ш. «Козацька». Для візуалізації масштабів та характеру техногенного впливу відібрано найбільш репрезентативні просторово-часові фрагменти, що ілюструють основні етапи деформації земної поверхні впродовж 84-річного періоду моніторингу (рис. 2). Представлений хронологічний ряд демонструє не лише кількісний приріст площі провальної зони, але й фіксує якісні зміни контурів руйнування та просторову асиметрію розвитку відносно головної осі простягання рудного покладу.

Аналіз рис. 2 свідчить, що найбільш ранній із доступних знімків стану земної поверхні в межах гірничого відводу ш. «Козацька» датується 1941 роком. На знімку чітко зафіксовано дві первинні ізольовані провальні воронки загальною площею 7,8 га, між якими також візуалізуються невеликі кар'єри, що відпрацьовували виходи рудного тіла під наноси.

Враховуючи історичні дані про те, що підземна розробка старими шахтами на цій ділянці розпочалася ще у 1907 році, а системний інтенсивний видобуток розгорнувся з 1923 року, можна стверджувати, що розвиток початкових обвалень земної поверхні припадає на часовий інтервал 1923–1941 рр. У подальші десятиріччя гірничі роботи активно розвивалися по площі найбільшого рудного покладу «Східний-Північний», що супроводжувалося формуванням значних об'ємів підземного виробленого простору. Як наслідок, інтенсифікація процесів зрушення та руйнування налягаючої товщі порід призвела до поступового розширення локальних провальних воронк та їхнього закономірного

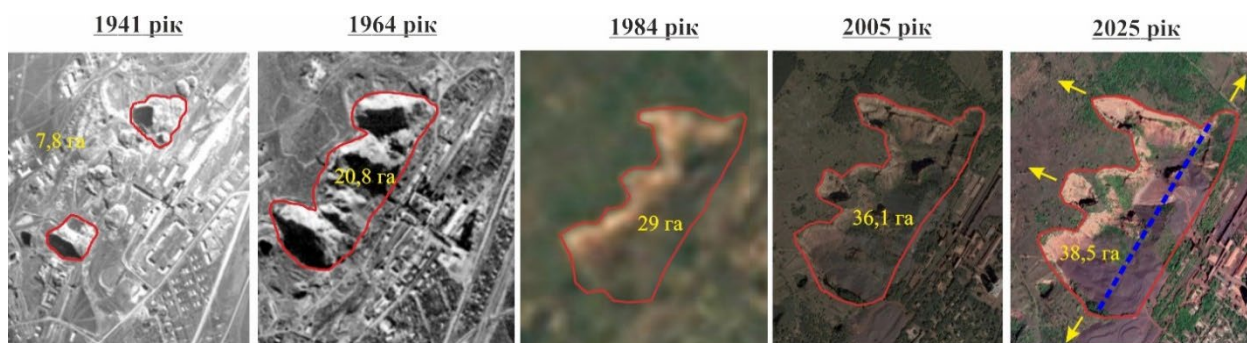


Рис. 2. Хронологічні фрагменти розвитку провальної зони ш. «Козацька»

поєднання в єдину суцільну провальну зону з вже поступовим збільшенням її контуру.

Слід відзначити, що просторовий розвиток провальної зони ш. «Козацька» має чітко виражений анізотропний характер і визначається геометрією рудного покладу та умовами зрушення масиву гірських порід. Аналіз сучасного стану на 2025 р. показує, що основне розширення провальної зони відбувається вздовж простягання покладу, що підтверджується орієнтацією витягнутої форми провалу та напрямком його подовження, який збігається з напрямком простягання рудного покладу (синя пунктирна лінія). Водночас у поперечному напрямку виділяються локальні ділянки інтенсивного розростання по периферії провальної зони, які приурочені до бортів та ділянок із підвищеною тріщинуватістю масиву та проявами екзогенних процесів й призведе до поступового утворення нових тріщин на земній поверхні зі сторони висячого боку. Такий характер просторового розвитку обумовлює поступове залучення до зони впливу прилеглих територій, зокрема природних ландшафтів, ділянок ґрунтового-рослинного покриву та елементів інфраструктури, розташованих у напрямках подальшого поширення провалу, що створює потенційні ризики їх деградації та потребує розробки нових заходів з його блокування. Важливо зазначити, що засипка провальних зон пустими шахтними породами вірогідно не вирішить проблеми, адже насипний

масив володіє пустотністю та здатністю до ущільнення.

У результаті визначення зміни площі провальної зони ш. «Козацька» за супутниковими знімками у певний проміжок часу виявлена залежність зміни у часі, що ілюструється на рис. 3. Аналіз результатів показує виражену динаміку зміни площі провальної зони шахти у часі, при цьому характер залежності найбільш точно, як з математичної, так і з геомеханічної точок зору, описується логарифмічною функцією. Така математична модель адекватно відображає фізичну суть механізму зсувних процесів, де початковий інтенсивний розвиток обвалення земної поверхні змінюється ефектом поступового затухання та просторової стабілізації обваленого масиву гірських порід і, як наслідок, провальної зони на земній поверхні. Хронологічний аналіз графіка дозволяє виокремити дві виразні фази прояву деформацій земної поверхні.

Перша фаза, що включає період 1941–1990 рр., характеризується інтенсивним руйнуванням земної поверхні та активним формуванням провальних форм і за цей період площа порушених земель стрімко зростає з 7,9 до 33,2 га, а приріст складає понад 320%. Виявлена кількісна динаміка повністю узгоджується з уявленнями криворізьких вчених, зокрема з дослідженнями проф. М. І. Ступніки [22] щодо наявності певної критичної глибини розробки,

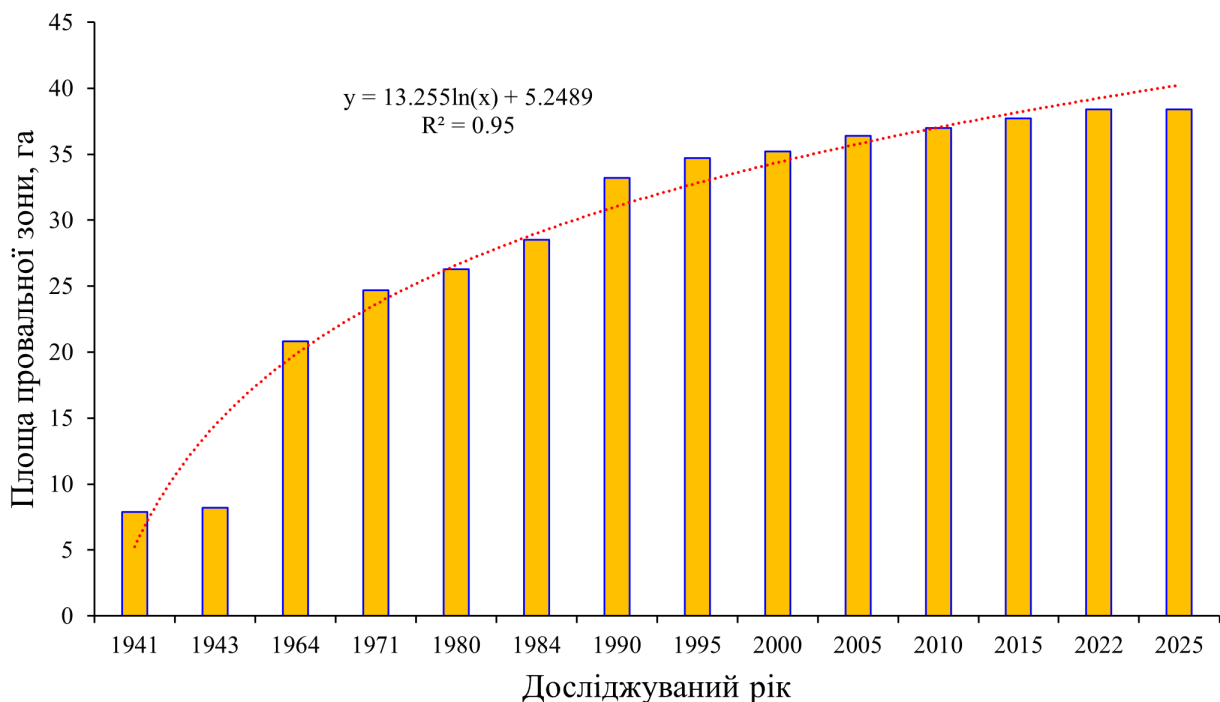


Рис. 3. Динаміка зміни площі провальної зони ш. «Козацька» за період 1941–2025 рр.

після досягнення якої активна стадія зрушення припиняється. Таке геомеханічне явище пояснюється тим, що обвалені у вироблений простір породи формують торцевий розпір та защемлення, підтримуючи підроблений масив. Для гірничо-геологічних умов ш. «Козацька» така критична глибина становить близько 600 м. Враховуючи, що глибина гірничих робіт у 1964 році складала 550 м, а до 1986 року досягла 1100 м, саме в цей період відбувся перехід через критичну позначку й простежується найбільш виражена кінетика розширення провалу.

Друга фаза, яка наступила орієнтовно з 1990 років і дотепер, ідентифікується як стадія затування процесів деформації вже без ознак масштабних активних руйнувань. Так, за останні 35 років приріст площі значно сповільнився і склав 5,2 га, тобто 15,6%. Проте, отримані результати дослідження акцентують увагу на важливому аспекті, якому раніше не приділялося достатньої уваги, – незважаючи на настання фази відносно стабілізації, просторове розширення провальної зони не зупиняється повністю, а продовжується зі зниженою швидкістю. На погляд авторів такий геомеханічний феномен пояснюється синергетичним ефектом комплексної дії гірничотехнічних та природних факторів. З одного боку, в порушеному масиві висячого боку ще реалізуються залишкові деформації, зумовлені вторинним ущільненням обрушених порід та їх частковим перепуском у вироблений простір під час відпрацювання глибших горизонтів. З іншого боку, відкрита провальна зона зазнає впливу екзогенних кліматичних чинників, а саме водної та вітрової ерозії, внаслідок яких відслонення скельних бортів і наносні породи продовжують руйнуватися та сповзати у провальний простір.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що поступове розширення провальних зон створює постійну загрозу для прилеглої інфраструктури, а також сприяє деградації ґрунтового покриву та природних екосистем, що функціонують на контакті з активною провальною зоною. У подальшому досліджується стан рослинності на прилеглій території до провальної зони ш. «Козацька».

Для наочного відображення характеристик зміни рослинності на прилеглій до провальної зони території було виконано картографування досліджених ділянок за вегетаційними індексами, результати якого представлено на рис. 4. Верхня пара мап (рис. 4, а, б) візуалізує просторовий розподіл вегетаційного індексу NDVI за літні періоди 2016 і 2025 років. Візуальний аналіз засвідчує помітне погіршення стану

рослинного покриву в межах буферних зон довкола провальних зон у 2025 році порівняно з 2016 роком, тоді як на контрольній ділянці фітомаса залишається візуально стабільною. Результати зонально-статистичного аналізу, проведеного у межах досліджуваних полігонів, кількісно підтверджують цю тенденцію. Так, станом на 2016 рік середньозважені значення індексу становили 0,400 і 0,420 для ближньої (50 м) та дальньої (100 м) буферних зон відповідно, і 0,450 для контрольної ділянки. Проте, у 2025 році ці показники деградували до 0,361 та 0,385 для відповідних буферних зон, у той час як на контрольному полігоні значення залишилося майже незмінним (0,448). Загалом значення NDVI впродовж усього періоду моніторингу варіювали в діапазоні від -0,071 до 0,700, що було прийнято за єдину базову макрошкалу для коректного порівняльного картографування. Значення NDVI за весь період спостережень в межах досліджених ділянок перебували в діапазоні від -0,071 до 0,7, що стало базовою шкалою для відображення на мапах.

На нижній парі мап (рис. 4, в, г) представлено усереднені значення NDVI за період 2016–2025 рр., отримані шляхом калькуляції відповідних растрів, що дає більш вагому характеристику стану рослин через нівелювання сезонних (річних) коливань. Отже, за період 2016–2025 рр. усереднені показники NDVI становили 0,425 і 0,445 для ближньої та дальньої буферної зони відповідно, та 0,493 для контрольної ділянки.

Нижня права мапа (рис. 4, г) уточнює розподіл за класами NDVI на досліджених ділянках. Результати зонально-статистичного розподілу площ за класами NDVI представлені у табл. 1. Аналіз даних таблиці кількісно підтверджує виражену зміну структури та якості рослинного покриву залежно від віддаленості від краю провальних зон.

Так, у ближній буферній зоні, на відстані 0–50 м від провальних зон, ступінь озеленення становить 75%, при цьому на розряджену рослинність припадає 21%, на нормальну рослинність 45%, і лише 9% на щільну рослинність. З віддаленням від епіцентру провальних зон у буферній зоні на відстані 50–100 м) чітко простежується тенденція до покращення фітоценозів. Основним індикатором послаблення техногенного впливу провальної зони є якісна трансформація класів NDVI. Визначено, що площа розрідженої рослинності зменшується майже вдвічі до 12,9%), проте частка нормальної рослинності зростає до 54,7%, а щільної – до 19,8%. Для об'єктивного порівняння, еталонна контрольна ділянка лісостепоного ландшафту,

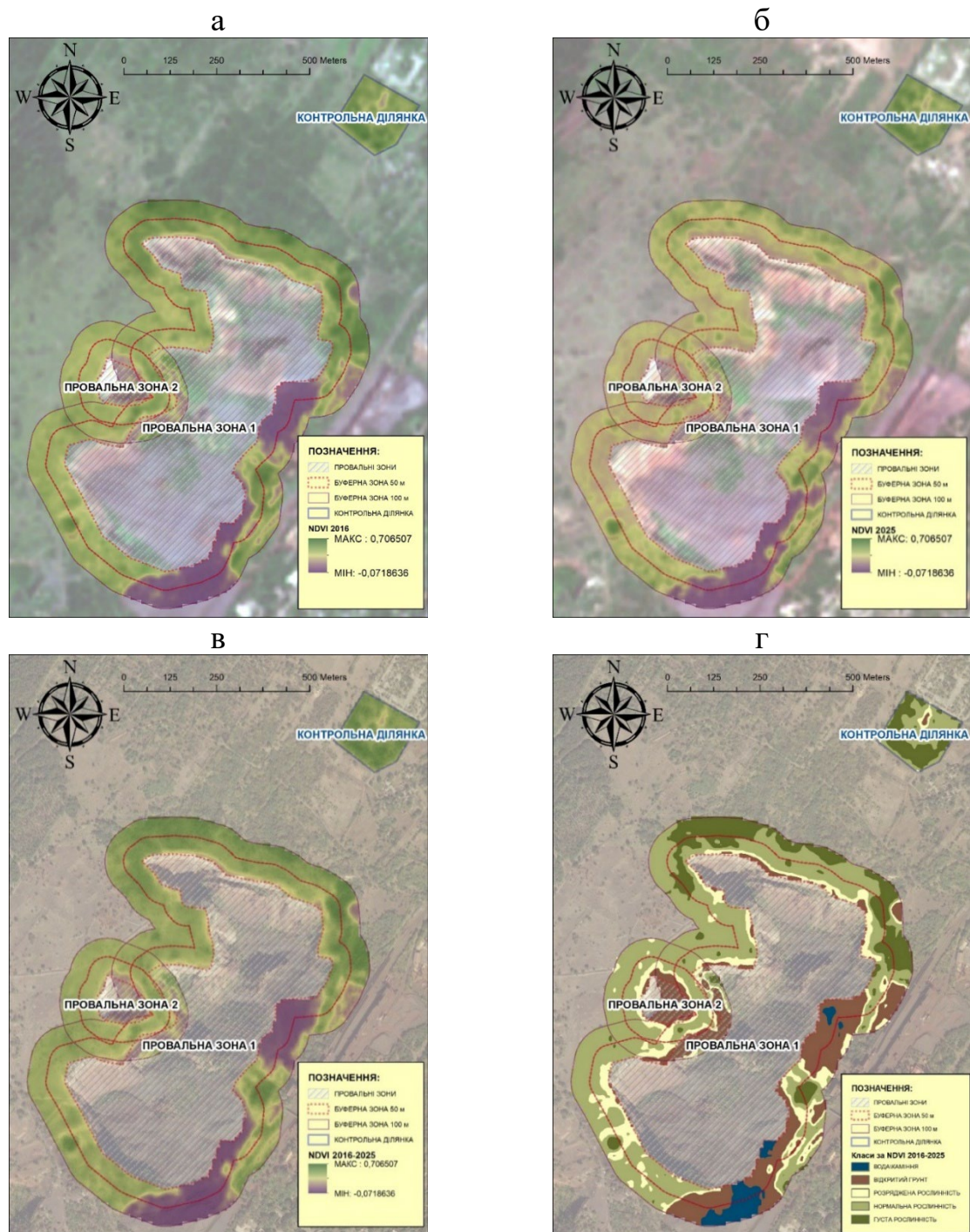


Рис. 4. Аналіз динаміки стану рослинності за показником NDVI: а – ситуація на червень 2016 р.; б – ситуація на червень 2025 р.; в – усереднені значення за період 2016–2025 рр.; г – класифікація за усередненими значеннями NDVI за період за період 2016–2025 рр.

яка не зазнає впливу гірничих робіт, демонструє принципово інший зонально-статистичний розподіл. Визначено, що ступінь її озеленення сягає понад 98%, причому майже половина площі 49,1% вкрита щільною здоровою рослинністю, ще 44,8% припадає на нормальну вегетацію, а розріджені ділянки та відкриті ґрунти складають лише 4,3 та 1,8% відповідно.

Детальний зонально-статистичний розподіл доводить, що провальна зона виступає не лише фактором повного руйнування земної поверхні під час масового обвалення, але й фактором пригнічення прилеглих природних екосистем у подальшій перспективі. Важливо, що негативний вплив має яскраво виражений градієнтний характер прояву, що призводить до помітного

розрідження фітомаси у міру наближення до контуру провальної зони.

Для більш детального розуміння часової еволюції стану фітоценозів проаналізовано динаміку середньозважених значень NDVI, що дозволяє простежити характер реакції рослинності у досліджуваних буферних зонах і на еталонній ділянці протягом десятирічного періоду моніторингу (рис. 5).

Аналіз гістограми (рис. 5) свідчить про наявність виражених міжрічних коливань значень вегетаційного індексу NDVI, що є природним явищем, зумовленим регіональною мінливістю гідрометеорологічних умов. Так, наприклад,

фіксуються контрастні показники вегетації у сприятливому 2021 році порівняно із більш посушливими 2022 і 2025 роками. Проте, важливим результатом є те, що ці коливання відбуваються синхронно на всіх трьох ділянках, зберігаючи при цьому чітку просторову закономірність.

Детальний аналіз часового ряду дозволяє виявити стійку негативну тенденцію та спадний тренд у динаміці розвитку фітоценозів навколо провальної зони. Якщо на еталонній контрольній ділянці значення NDVI впродовж десятиріччя коливаються на рівні 0,45–0,55, то у буферних зонах простежується поступова довгострокова

Таблиця 1

Зонування розподілу території навколо провальних зон за класами NDVI та контрольної ділянки (усереднені значення за період 2016–2025 рр.)

Територія	Вода/каміння		Ґрунти		Розряджена рослинність		Нормальна рослинність		Щільна рослинність	
	м ²	%	м ²	%	м ²	%	м ²	%	м ²	%
<i>На відстані 0–50 м від провальних зон</i>										
Провальна зона 1	5100	3,4	36100	24,0	28100	18,6	65700	43,6	15700	10,4
Провальна зона 2	0	0,0	4000	13,6	9200	31,2	16100	54,6	200	0,7
Сума (середній, %)	5100	2,8	40100	22,3	37300	20,7	81800	45,4	15900	8,8
<i>На відстані 50–100 м від провальних зон</i>										
Провальна зона 1	7800	5,2	33000	21,9	16400	10,9	72500	48,1	34200	22,7
Провальна зона 2	0	0,0	10900	36,9	6800	23,1	26000	88,1	1500	5,1
Сума (середній, %)	7800	4,3	43900	24,4	23200	12,9	98500	54,7	35700	19,8
Контрольна ділянка	0	0,0	500	1,8	1200	4,3	12400	44,8	13600	49,1



Рис. 5. Динаміка усереднених значень NDVI рослинного покриття прилеглих до провальних зон територій за період 2016-2025 рік

деградація. У найбільш вразливій зоні (0–50 м) показники вегетації знизилися з 0,38 у 2016 році до критичних 0,33 у 2025 році. Такий факт доводить, що незалежно від сприятливості сезонних кліматичних факторів, геомеханічний та ерозійний вплив провальної зони чинить стресовий тиск на прилеглу екосистему, знижуючи її біологічну продуктивність порівняно з природним фоном.

Певним обмеженням даного дослідження є те, що високоточний ретроспективний аналіз екологічного стану за вегетаційним індексом NDVI охоплює лише період 2016–2025 рр., тоді як фаза умовної стабілізації геомеханічних процесів розпочалася ще у 1990-х роках. Використання більш ранніх супутникових архівів, наприклад, як старих даних Landsat для оцінки рослинності минулих десятиріч ускладнене їхньою низькою просторовою роздільною здатністю 30×30 м, що не дозволяє провести адекватне мікрозонування вузьких буферних ділянок шириною 50–100 м. Проте, навіть отриманий 10-річний масив даних NDVI доводить, що перебування провальної зони у фазі затухання не означає припинення її впливу, а процес розширення продовжується у вигляді кумулятивного повзучого ефекту, що потребує нових підходів екологічної безпеки та консервації порушених земель. Традиційні рішення щодо блокування розвитку провалів шляхом їх засипки пустими шахтними породами є мало-ефективними, оскільки насипний масив характеризується високою пустотністю, здатністю до вторинного ущільнення та не створює надійного підпору для висячого боку родовища. Більш перспективним та надійним варіантом, хоча й економічно витратнішим на етапі впровадження, є заповнення відкритих техногенних пустот пастовим монолітним закладанням на основі хвостів збагачення залізних руд [23]. Такий підхід дозволить створити більш жорсткий штучний масив, частково блокувати зсувні процеси прилегло до провальних зон шару земної поверхні та зменшити подальшу деградацію прилеглих екосистем.

Також перспективи подальших наукових пошуків пов'язані з поглибленим вивченням трансформації ґрунтово-рослинного шару за допомогою індексів SAVI та NDWI, що дозволить кількісно оцінити дефіцит вологи в ґрунтах,

спричинений дренажним впливом техногенної тріщинуватості навколо провальної зони.

Висновки.

1. Встановлено, що просторово-часова динаміка розвитку провальної зони шахти «Козацька» за період 1941–2025 рр. достовірно описується логарифмічною залежністю і поділяється на дві виразні фази. Перша активна фаза до 1990 року характеризувалася стрімким руйнуванням земної поверхні із приростом площі понад 320%. Друга фаза з 1990 року та дотепер є стадією затухання, проте розширення меж обвалення не зупинилося повністю й триває зі зниженою швидкістю вздовж осі простягання рудного покладу й убик висячого боку за рахунок синергетичної дії залишкових деформацій масиву та екзогенних ерозійних процесів.

2. Виявлено чітко виражений просторовий градієнт екологічної деградації прилеглих територій під впливом геомеханічних зрушень. Зонально-статистичний аналіз значень індексу NDVI довів, що у ближній буферній зоні 0–50 м від кромки провалу рослинність зазнає максимального стресу. Частка щільної фітомаси є вельми низькою 8,8%, тоді як майже половина території перетворена на відкриті ґрунти та пригнічені ділянки. З віддаленням до 100 м фіксується послаблення техногенного тиску та відновлення рослинності, проте її параметри залишаються суттєво гіршими за еталонний природний фон.

3. Визначено, що впродовж останнього десятиріччя 2016–2025 рр. стан фітоценозів навколо провальної зони має стійку негативну тенденцію до погіршення. Незалежно від сприятливості сезонних кліматичних факторів, показники вегетації у найбільш вразливій буферній зоні мають тренд до зниження з 0,38 до 0,33, що підтверджує поступову деградацію ґрунтово-рослинного покриву.

Підтримка. Дослідження проводилося у рамках прикладного наукового проєкту «Розробка нових прикладних і нормативних рішень для ресурсоефективної утилізації техногенних відходів та ліквідації пустот гірничорудних регіонів у контексті циркулярної економіки» (№ державної реєстрації 0126U001271), що фінансується Міністерством освіти та науки України за рахунок державного бюджету.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ericsson M., Löf O. Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016. *Mineral Economics*. 2019. Vol. 32(2). P. 223–250. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00191-6>
2. Pell R., Tijsseling L., Goodenough K., Wall F., Deak D., Yan X., Li C. Towards sustainable extraction of technology materials through integrated approaches. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021. Vol. 2(10). P. 665–679. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00211-6>

3. Araujo F. S. M., Taborda-Llano I., Nunes E. B., Santos R. M. Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. *Geosciences*. 2022. Vol. 12(9). Art. 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
4. International Energy Agency. *The role of critical minerals in clean energy transitions*. 2021. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
5. Maus V., Giljum S., Gutschlhofer J., da Silva D. M., Probst M., Gass S. L. B., Luckeneder S., Lieber M., McCallum I. A global-scale data set of mining areas. *Scientific Data*. 2020. Vol. 7(1). Art. 289. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00624-w>
6. Salmi E. F., Nazem M., Karakus M. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence. *Engineering Geology*. 2017. Vol. 217. P. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.12.021>
7. Werner T. T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*. 2019. Vol. 6(3). P. 993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.011>
8. Franks D. M., Keenan J., Tonda E., Kariuki A. *Mineral resource governance and the global goals: An agenda for international collaboration*. 2022. Summary of the UNEA 4/19 Consultations.
9. Sonter L. J., Dade M. C., Watson J. E. M., Valenta R. K. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11(1). Art. 4174. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
10. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. 2022. Київ: Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 514 с.
11. Bazaluk O., Petlovanyi M., Sai K., Chebanov M., Lozynskyi V. Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: case study of Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*. 2024. Vol. 12. Art. 1480344. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344>
12. Коптєва Т. С. Формування провального рельєфу в умовах гірничопромислових ландшафтів Криворізької ландшафтно-технічної системи. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2025. Вип. 44. С. 47–59. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-04>
13. Петльованій М. В. Особливості утворених зон обвалення земної поверхні від впливу підземної розробки крутоспадних рудних покладів в умовах Кривбасу. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2024. № 79. С. 63–83. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.063>
14. Tassi A., Vizzari M. Object-oriented LULC classification in Google Earth engine combining SNIC, GLCM, and machine learning algorithms. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12(22). Art. 3776. <https://doi.org/10.3390/rs12223776>
15. Yang Z., Li J., Li P. Satellite-based monitoring of surface deformation and its impact on vegetation in mining areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 112. Art. 102943. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102943>
16. Lechner A. M., Baumgartl T., Matthew P., Glenn V. The impact of underground coal mining on surface vegetation and hydrology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2016. Vol. 232. P. 117–126.
17. Fan H., Cheng L., Lu L. Impact of coal mining subsidence on the quality of cultivated land and vegetation health. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 312. Art. 127738. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127738>
18. Buta M., Blaga G., Paulette L., Păcurar I., Roșca S., Borsai O., Grecu F., Sînziana P. E., Negrușier C. Soil Reclamation of abandoned mine lands by revegetation in Northwestern Part of Transylvania: A 40-year retrospective study. *Sustainability*. 2019. Vol. 11(12). Art. 3393. <https://doi.org/10.3390/su11123393>
19. Karan S. K., Samadder S. R., Maiti S. K. Assessment of the spatio-temporal changes of vegetation cover in coal mining areas using multi-temporal satellite images. *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 61. P. 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.049>
20. *OldMaps*. Retrived from: <https://oldmaps.com.ua/>
21. *Copernicus Data Space Ecosystem Browser*. Retrived from: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
22. Ступнік М. І., Маланчук Є. З. Визначення параметрів зон зсуву і обвалення наносних глинистих порід при підземній розробці рудних родовищ. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2011. Вип. 3(55). С. 178–182.
23. Petlovanyi M., Sai K. Research into cemented paste backfill properties and options for its application: Case study from a Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. Vol. 18(4). P. 162–179. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.162>

REFERENCES:

1. Ericsson, M., & Löf, O. (2019). Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016. *Mineral Economics*, 32(2), 223–250. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00191-6>
2. Pell, R., Tijsseling, L., Goodenough, K., Wall, F., Deak, D., Yan, X., & Li, C. (2021). Towards sustainable extraction of technology materials through integrated approaches. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(10), 665–679. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00211-6>

3. Araujo, F. S. M., Taborda-Llano, I., Nunes, E. B., & Santos, R. M. (2022). Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. *Geosciences*, 12(9), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
4. International Energy Agency. (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
5. Maus, V., Giljum, S., Gutschlhofer, J., da Silva, D. M., Probst, M., Gass, S. L. B., Luckeneder, S., Lieber, M., & McCallum, I. (2020). A global-scale data set of mining areas. *Scientific Data*, 7(1), 289. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00624-w>
6. Salmi, E. F., Nazem, M., & Karakus, M. (2017). Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence. *Engineering Geology*, 217, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.12.021>
7. Werner, T. T., Bebbington, A., & Gregory, G. (2019). Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*, 6(3), 993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.011>
8. Franks, D. M., Keenan, J., Tonda, E., & Kariuki, A. (2022). *Mineral resource governance and the global goals: An agenda for international collaboration*. Summary of the UNEA 4/19 Consultations.
9. Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M., & Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11(1), 4174. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
10. *Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Ukraini u 2021 rotsi* [National Report on the State of the Environment in Ukraine in 2021] (2022). Kyiv: Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy, 514 s [in Ukrainian].
11. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Sai, K., Chebanov, M., & Lozynskyi, V. (2024). Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: case study of Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344>
12. Koptieva, T. S. (2025). Formuvannia provalnoho reliefu v umovakh hirnychopromyslovykh landshaftiv Kryvorizkoi landshaftno-tekhnichnoi systemy [Formation of a sinkhole relief in the conditions of mining landscapes of the Kryvyi Rih landscape and technical system]. *Liudyna ta dovkillia. Problemy neoeekolohii*, 44, 47–59 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-04>
13. Petlovanyi, M.V. (2024). Osoblyvosti utvorenykh zon obvalennia zemnoi poverkhni vid vplyvu pidzemnoi rozrobky krutospadnykh rudnykh pokladiv v umovakh Kryvbasu [Features of the formed zones of collapse of the earth's surface from the influence of underground mining of steeply sloping ore deposits in the conditions of Kryvbas]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 79, 63–83 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.063>
14. Tassi, A., & Vizzari, M. (2020). Object-oriented LULC classification in Google Earth engine combining SNIC, GLCM, and machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(22), 3776. <https://doi.org/10.3390/rs12223776>
15. Yang, Z., Li, J., & Li, P. (2022). Satellite-based monitoring of surface deformation and its impact on vegetation in mining areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102943. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102943>
16. Lechner, A. M., Baumgartl, T., Matthew, P., & Glenn, V. (2016). The impact of underground coal mining on surface vegetation and hydrology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 117–126.
17. Fan, H., Cheng, L., & Lu, L. (2021). Impact of coal mining subsidence on the quality of cultivated land and vegetation health. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127738. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127738>
18. Buta, M., Blaga, G., Paulette, L., Păcurar, I., Roșca, S., Borsai, O., Grecu, F., Sînziana, P. E., & Negrușier, C. (2019). Soil reclamation of abandoned mine lands by revegetation in Northwestern Part of Transylvania: A 40-year retrospective study. *Sustainability*, 11(12), 3393. <https://doi.org/10.3390/su11123393>
19. Karan, S. K., Samadder, S. R., & Maiti, S. K. (2016). Assessment of the spatio-temporal changes of vegetation cover in coal mining areas using multi-temporal satellite images. *Ecological Indicators*, 61, 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.049>
20. *OldMaps*. Retrived from: <https://oldmaps.com.ua/>
21. *Copernicus Data Space Ecosystem Browser*. Retrived from: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
22. Stupnik, M. I., & Malanchuk, Ye. Z. (2011). Vyznachennia parametriv zon zsuvu i obvalennia nanosnykh hlynystykh porid pry pidzemnii rozrobtsi rudnykh rodovysch [Determination of parameters of shear and collapse zones of alluvial clay rocks during underground development of ore deposits]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*, 3(55), 178–182 [in Ukrainian].
23. Petlovanyi, M., & Sai, K. (2024). Research into cemented paste backfill properties and options for its application: Case study from a Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 18(4), 162–179. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.162>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 004.852:004.67

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-4>

ВПЛИВ СТРАТЕГІЇ ФОРМУВАННЯ НАВЧАЛЬНОГО ВІКНА НА ЯКІСТЬ ПЕРЕНАВЧАННЯ МОДЕЛІ XGBOOST В УМОВАХ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ДРЕЙФУ B2B-ТРАНЗАКЦІЙ

Мірошниченко Сергій Олександрович,

аспірант, старший викладач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0007-4868-3006

Стаття містить порівняльне дослідження одинадцяти стратегій формування навчального вікна для алгоритму XGBoost у задачі бінарної класифікації успішності B2B-замовлень в умовах концептуального дрейфу. Дослідження виконано на деперсоніфікованому масиві 86 786 транзакцій промислової ERP-системи за період липень 2017 – листопад 2024 р. Оцінювання проводилося за преквенційним протоколом із щомісячним перенавчанням на 76-місячному горизонті. Порівнювалися чотири категорії стратегій: кумулятивна, фракційні (1/2, 1/3, 1/4), часові (3, 4, 6, 12 місяців) і лічильникові (3 000, 5 000, 10 000 записів). В результаті стратегія «часове вікно 6 місяців» показала найвище значення показнику ROC-AUC = 0,9440, найнижче LogLoss = 0,2732 та мінімальний коефіцієнт варіації (CV = 0,0269). Найгірший результат серед часових конфігурацій показала стратегія «Часове вікно 12 місяців» (ROC-AUC = 0,9302). Кумулятивна стратегія, попри доступ до понад 80 тис. записів на пізніх ітераціях, систематично поступалася більш оптимальним за розміром вікнам внаслідок ефекту «катастрофічного запам'ятовування» (Catastrophic Retention) – надмірного збереження нерелевантних застарілих патернів, симетричного до «катастрофічного забування» в нейронних мережах. Статистичну значущість відмінностей підтверджено критерієм Фрідмана ($\chi^2 = 99,89$; $p < 10^{-16}$; $W = 0,131$) та тестами Вілкоксона з поправкою Бонферроні (17 із 55 пар значущі при $\alpha = 0,05$). Застосування стратегії, що відповідає часовому вікну 6 місяців (Time 6M) замість кумулятивної скорочує обчислювальні витрати вдвічі, реалізуючи принципи Green AI в промислових MLOps-конвеєрах.

Ключові слова: машинне навчання, XGBoost, концептуальний дрейф, навчальне вікно, перенавчання моделей, B2B-прогнозування, преквенційна оцінка, ERP-системи, катастрофічне запам'ятовування.

Miroshnychenko Serhii. Impact of training window formation strategy on XGBoost model retraining quality under concept drift in B2B transactions

This paper presents a systematic comparative study of eleven training window strategies for the XGBoost algorithm in a binary classification task of B2B order success prediction under concept drift. The study is conducted on a depersonalized dataset of 86,786 transactions from a real industrial ERP system spanning from July 2017 to November 2024. Evaluation follows a prequential protocol with monthly model retraining over a 76-month streaming horizon. Four strategy categories are compared: cumulative (full history), fractional (1/2, 1/3, 1/4 of history), temporal (12, 6, 4, 3 months), and count-based (10,000; 5,000; 3,000 samples). The “6-month time window” strategy achieved the highest global ROC-AUC of 0.9440 and the lowest LogLoss of 0.2732, while simultaneously exhibiting the lowest coefficient of variation (CV – 0.0269). The “12-month time window” strategy showed the worst result among the time configurations (ROC-AUC = 0.9302). The cumulative strategy, despite access to over 80,000 records in later iterations, systematically lost to more optimally sized windows due to the author-proposed “Catastrophic Retention” effect — the excessive preservation of irrelevant, outdated patterns, symmetric to catastrophic forgetting in neural networks. Statistical significance of differences is confirmed by the Friedman test ($\chi^2 = 99,89$; $p < 10^{-16}$; $W = 0,131$) and pairwise Wilcoxon signed-rank tests with Bonferroni correction (17 of 55 pairs significant at $\alpha=0.05$). Replacing the cumulative strategy with a “6-month time window” strategy reduces retraining computational costs by half, implementing Green AI principles in industrial MLOps pipelines.

Key words: machine learning, XGBoost, concept drift, training window, model retraining, B2B forecasting, prequential evaluation, ERP systems, order classification, non-stationary environment, catastrophic retention.

Вступ. Розвиток корпоративних інформаційних систем характеризується переходом від ретроспективного обліку до проактивного управління операційними процесами. Традиційні системи планування ресурсів підприємства (ERP), що побудовані на архітектурі реляційних баз даних, забезпечували переважно статичну звітність на основі кількісних метрик минулих періодів [1; 2], що суттєво обмежувало їхню адаптивність до динамічного бізнес-середовища [3]. Інтеграція алгоритмів машинного навчання в ERP-системи сформувала концепцію інтелектуальних ERP (i-ERP): накопичені масиви транзакційних даних трансформуються в інструменти предиктивної аналітики та підтримки рішень у режимі реального часу [4; 5]. ML-моделі виявляють приховані патерни, прогнозують попит, оптимізують ланцюги поставання і передбачають фінансові ризики [5; 6].

Стратегічне значення у цьому контексті набуває задача предиктивного скорингу B2B-транзакцій, тобто оцінки ймовірності успішного закриття комерційних угод. Точність таких прогнозів безпосередньо впливає на оптимізацію ресурсів відділів продажу, планування виробничих потужностей і управління фінансовими потоками [4]. Практичне розгортання прогностичних моделей в ERP-середовищі неминує стикатися з проблемою деградації якості прогнозування внаслідок нестаціонарності середовища.

Деградація ML-моделей зумовлена концептуальним дрейфом – зміною прихованих статистичних залежностей між предикторами та цільовою змінною з плином часу [7; 8]. Формально, якщо розподіл даних у момент t_0 відрізняється від розподілу в момент t_1 , то дрейф зафіксовано. Декомпозиція Баєса $P(X,y) = P(y|X) \cdot P(X)$ дозволяє виокремити три джерела нестаціонарності: коваріатний зсув (зміна розподілу $P(X)$ при незмінній функції $P(y|X)$, що проявляється, наприклад, як зростання середніх сум замовлень унаслідок інфляції); зсув апіорної ймовірності (зміна розподілу класів $P(y)$, характерна для кризових періодів зі стрибкоподібним зростанням частки скасованих замовлень); справжній концептуальний дрейф (еволюція апостеріорного розподілу $P(y|X)$, тобто зміна правил прийняття рішень унаслідок трансформації ринкової кон'юнктури). Остання форма є найскладнішою для виявлення та адаптації [7; 9; 10].

За характером часових змін концептуальний дрейф поділяється на чотири типи: раптовий (геополітичні шоки), поступовий (паралельне співіснування старого та нового концептів), інкрементний (повільна безперервна

трансформація) та рекурентний (повернення до попередніх концептів, характерне для сезонних і циклічних збурень). Макроекономічні збурення, сезонність і безперервна зміна поведінки контрагентів формують у B2B-секторі нестаціонарне середовище, за умов якого статично навчена модель неминує втрачати прогностичну валідність [7; 11; 12].

Дослідження у сфері потокового навчання традиційно зосереджуються на статистичних детекторах дрейфу: DDM, EDDM та ADWIN [13–15]. Проте застосування цих алгоритмів до табличних ERP-даних виявляє суттєві обмеження: висока зашумленість і дисбаланс класів B2B-транзакцій провокують надмірну кількість хибних спрацювань [16]. Зазначені детектори розроблялися для інкрементних алгоритмів (дерева Хеффіна, наївний Баєс), тоді як індустріальним стандартом для табличних даних є ансамблеві пакетні моделі, зокрема XGBoost, для яких безперервне перенавчання обчислювально нерентабельне [11; 17]. Стандартом MLOps-архітектури залишається регулярне пакетне перенавчання на оновленому масиві даних [18; 19].

Ключовою архітектурною проблемою пакетного перенавчання є визначення оптимального обсягу навчальної вибірки. Виокремлюють чотири категорії стратегій: кумулятивні (повна накопичена історія), фракційні (фіксована частка від поточного обсягу), часові ковзні (жорсткий календарний горизонт) і лічильникові (фіксована кількість найновіших записів). Кумулятивна стратегія зберігає максимальну статистичну різноманітність, проте включає застарілі патерни, що конфліктують із поточним розподілом. Фракційні стратегії автоматично масштабуються з ростом даних, але не враховують часову структуру. Часові вікна забезпечують актуальність ціною можливої втрати обсягу під час сезонних спадів. Лічильникові вікна фіксують кількість записів, ігноруючи часову динаміку [20–22].

В емпіричній літературі порівняльний аналіз стратегій вікна залишається недостатньо формалізованим. В роботі [23] продемонстровано перевагу помірних ковзних вікон над великими статичними блоками у задачах пакетної класифікації в умовах дрейфу, однак без кількісної верифікації на реальних B2B-даних. Автори [24] досліджували адаптацію кредитного скорингу на основі градієнтного бустингу без систематичного порівняння кількох стратегій навчального вікна. В дослідженні [25] автори систематизують підходи до перенавчання в контексті загальної теорії дрейфу без емпіричного

порівняння більш ніж трьох конфігурацій. У суміжних областях – прогнозуванні дефектів програмного забезпечення [26] та фінансовому скорингу – підтверджено перевагу ковзних вікон над кумулятивними підходами та критичну залежність XGBoost від горизонту навчальних даних [27; 28]. Оскільки більшість попередніх досліджень обмежується двома-трьма конфігураціями, комплексне оцінювання широкого спектру стратегій на реальних нестационарних B2B-транзакціях залишалося незавершеним.

Мета дослідження — систематичне порівняльне оцінювання одинадцяти стратегій формування навчального вікна для XGBoost у задачі прогнозування успішності B2B-замовлень із застосуванням преквенційного протоколу, статистичних критеріїв значущості та аналізу компромісу між прогностичною якістю, стабільністю й обчислювальною вартістю.

Для досягнення мети визначено наступні завдання:

1. Реалізувати 76-місячну преквенційну симуляцію з щомісячним перенавчанням для чотирьох категорій стратегій;
2. Оцінити глобальні та щомісячні метрики якості класифікації;
3. Верифікувати статистичну значущість відмінностей між стратегіями;
4. Проаналізувати компроміс між якістю, стабільністю та обчислювальними витратами.

Методи та методики дослідження.

Емпіричну базу дослідження становлять 86 786 деперсонфікованих B2B-транзакцій реальної промислової ERP-системи за період із 29 липня 2017 р. по 26 листопада 2024 р. Транзакції, датовані після 1 грудня 2024 р., вилучено як неповні. Цільова змінна `is_successful` є бінарним індикатором: клас «1» відповідає угоді,

успішно закритій із дотриманням зобов'язань і плановою маржинальністю; клас «0» – скасуванню, критичному відстроченню або збитковому закриттю.

Динаміка щомісячного обсягу транзакцій та середнього відсотка успішних угод ілюструє структурні збурення: виражену волатильність обсягів замовлень у 2020–2021 роках і різке синхронне падіння кількості транзакцій та частки їх успішності на початку 2022 року (рис. 1). Така нелінійна поведінка часових рядів із формуванням нових патернів стабілізації підтверджує наявність інтенсивного концептуального дрейфу та методично обґрунтовує відмову від статичних моделей на користь регулярного преквенційного перенавчання.

Річна структура транзакцій демонструє ефект зсуву априорної ймовірності: у 2020–2021 роках частка успішних угод знизилася до 53,1% та 50,7% відповідно, тоді як у 2017–2018 та 2023–2024 роках вона перевищувала 70%. Ця виражена нестабільність балансу класів пояснює вразливість кумулятивної стратегії навчального вікна, яка інтегрує суперечливі історичні пропорції в єдиний простір навчання.

Простір ознак налічує 35 предикторів п'яти аналітичних категорій: фінансові метрики (сума замовлення, середня ціна позиції, середній чек контрагента для загальних, успішних і неуспішних угод), кількісні метрики (кількість рядків, унікальних продуктів, загальний обсяг позицій), комунікаційні метрики (інтенсивність CRM-взаємодії, кількість цінових ітерацій та змін у замовленні на рівні угоди й контрагента), часові предиктори (година, день тижня, місяць, рік, ознаки вихідного дня, початку/кінця місяця, інтервал від попереднього замовлення) і калькулятивні метрики (відношення суми замовлення

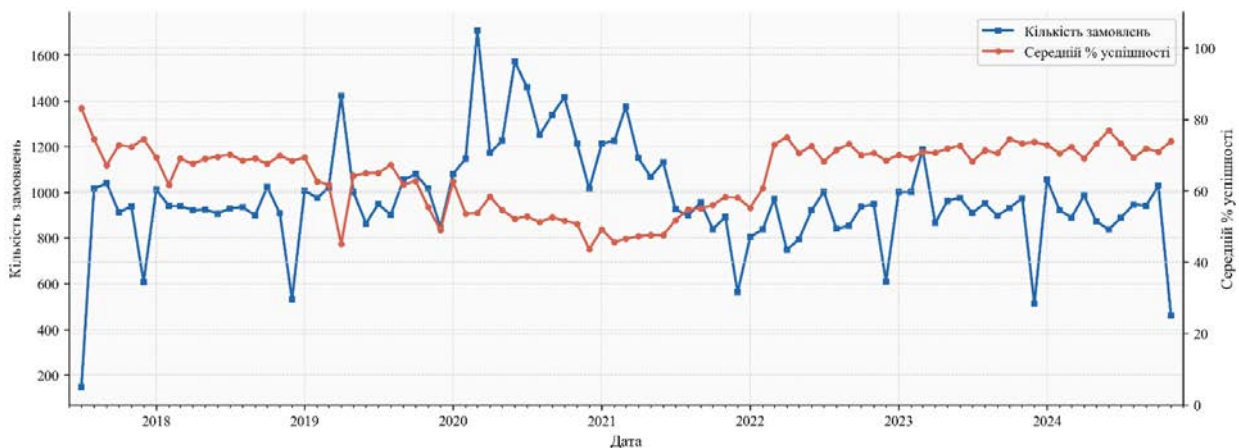


Рис. 1. Динаміка щомісячного обсягу B2B-замовлень та частки успішних угод (липень 2017 – листопад 2024 рр.)

до середнього чеку контрагента, вартість на рядок, коефіцієнт комунікаційної інтенсивності, питома вартість продукту відносно середнього чеку). Пропущені значення інтервальних метрик імпутовано значенням «-1»; для фіксації першої взаємодії контрагента введено бінарний прапорець `is_first_order`.

Стандартна k -кратна перехресна перевірка є методологічно некоректною для часово залежних нестационарних даних: випадкове перемішування руйнує хронологічну послідовність і спричиняє витік інформації. Дослідження реалізовано за преквенційним протоколом (Predict-then-Learn) – стандартним підходом для оцінювання моделей в умовах нестационарності [29–31].

Протокол охоплює дві фази. На фазі ініціалізації перші 12 місяців даних (29.07.2017–29.07.2018; 11 157 записів; частка позитивного класу 69,76%) використано для початкового навчання базової моделі M_0 . Упродовж потокової фази (76 місяців-ітерацій; серпень 2018 – листопад 2024; 75 546 записів; частка позитивного класу 62,09%) щомісяця виконується чотири кроки: модель M_t генерує прогнози для транзакцій поточного місяця D_t до перенавчання; обчислюються повні метрики класифікації з фіксацією ROC-AUC та LogLoss; записи місяця t додаються до загального сховища; нова навчальна вибірка W_t формується відповідно до поточної стратегії вікна і модель M_{t+1} повністю перенавчається на W_t . Такий порядок унеможливорює витік даних, оскільки модель завжди оцінюється на ще непобачених прикладах.

Зниження частки успішних угод із 69,8% на фазі ініціалізації до 62,1% у потоковій фазі кількісно підтверджує зсув апріорної ймовірності (рис. 3). Ця структурна розбіжність обґрунтовує застосування динамічного балансування класів під час потокового перенавчання – зокрема, ітеративного перерахунку гіперпараметра `scale_pos_weight` для кожного нового зрізу навчального вікна. Протокол генерує часовий ряд метрик довжиною 76 точок на кожну стратегію, що забезпечує репрезентативний статистичний аналіз [31].

Порівнювалися одинадцять стратегій формування навчального вікна, об'єднаних у чотири категорії (табл. 1).

Кумулятивна стратегія (Full History) використовує всю доступну історію: обсяг вікна монотонно зростає від ~12 000 записів на початку потокової фази до ~86 700 наприкінці. Фракційні стратегії (Frac 1/2, Frac 1/3, Frac 1/4) відбирають фіксовану частку від найновіших записів, зберігаючи постійне співвідношення «свіжих» і «давніх» даних. Часові стратегії (Time 12M, Time 6M, Time 4M, Time 3M) обмежують вибірку календарним горизонтом: Time 6M містила від ~5 000 до ~8 400 записів залежно від сезонної активності. Лічильникові стратегії (Count 10K, Count 5K, Count 3K) фіксують абсолютну кількість найновіших записів, що забезпечує сталий обсяг, проте змінює часову глибину відповідно до інтенсивності транзакцій.

Як механізм предиктивного моделювання обрано XGBoost – індустріальний стандарт класифікації на фінансових і операційних табличних даних [32]. Алгоритм демонструє

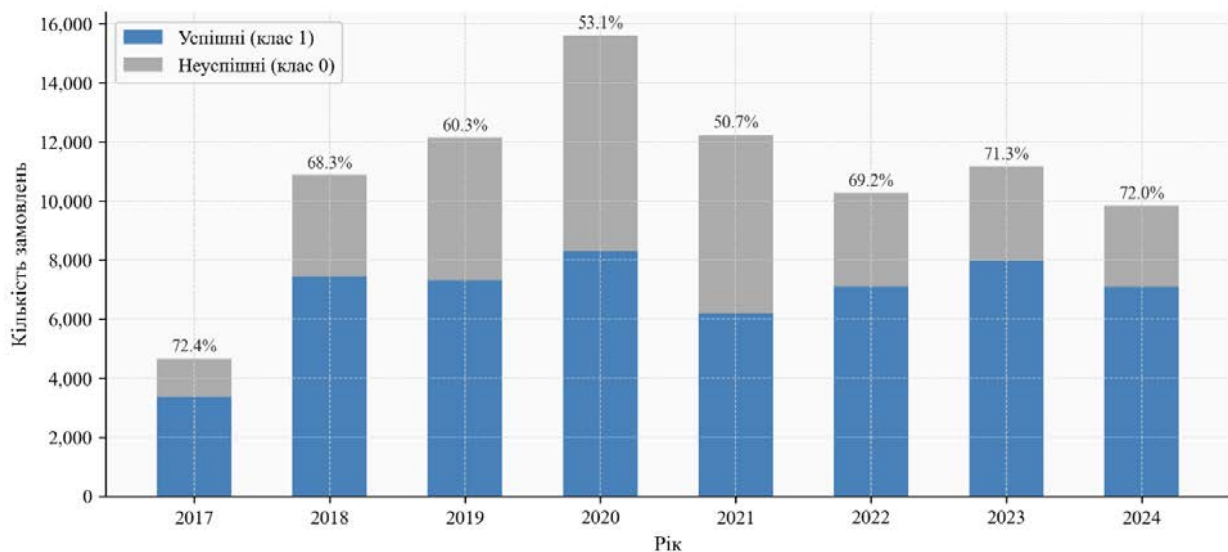


Рис. 2. Річна динаміка загального обсягу та структури B2B-замовлень за класами успішності (2017–2024 рр.)

стійкість до нелінійних залежностей, автоматичну обробку пропущених значень і стійкість до викидів. Об'єктивна функція L на ітерації t поєднує функцію втрат l та регуляризаційний член Ω :

$$L^{(t)} = \sum_i l(y_i, \hat{y}_i^{(t)}) + \Omega(f_t)$$

В умовах концептуального дрейфу суперечність між старою та новою інформацією у навчальній вибірці спричиняє розмиття меж прийняття рішень, що робить алгоритм надзвичайно чутливим до обсягу навчального вікна [7; 27].

В усіх стратегіях використано єдину конфігурацію для забезпечення коректності порівняння (табл. 2).

Параметр *scale_pos_weight* обчислювався динамічно для кожного циклу перенавчання як

відношення негативних до позитивних прикладів у поточному навчальному вікні.

Якість класифікації оцінювалась за дев'ятьма метриками: ROC-AUC (площа під ROC-кривою), PR-AUC (площа під кривою точність–повнота), F1-міра, Ассурасу (загальна точність), Precision (точність), Recall (повнота), MCC (коефіцієнт кореляції Метьюса), Brier Score (оцінка каліброваності ймовірностей) та LogLoss (логарифмічна втрата). Для кожної метрики обчислювались глобальне агреговане значення, помісячне середнє, стандартне відхилення та коефіцієнт варіації (CV).

Для перевірки значущості відмінностей між стратегіями застосовано два непараметричні критерії. Оскільки преквенційний протокол генерує зв'язані вибірки (різні алгоритми на однакових часових блоках), параметричні тести

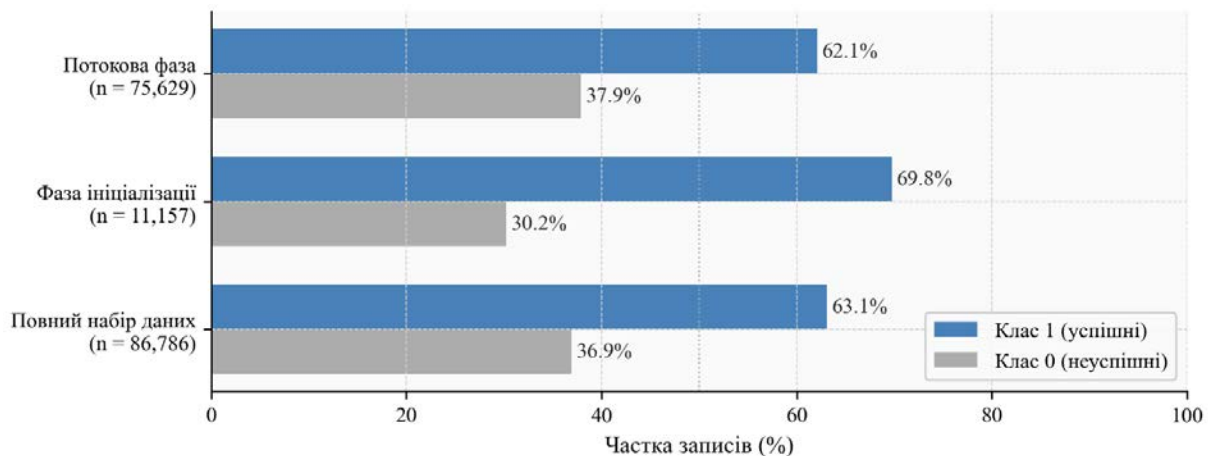


Рис. 3. Розподіл класів успішності транзакцій за фазами преквенційного симулювання

Таблиця 1

Стратегії формування навчального вікна

Категорія	Стратегія	Механізм формування	Динаміка обсягу
Кумулятивна	Full History	Увесь накопичений масив	Монотонне зростання (~12K → ~87K)
Фракційна	Frac 1/2	Останні 50% записів	Пропорційне зростання
Фракційна	Frac 1/3	Останні 33% записів	Пропорційне зростання
Фракційна	Frac 1/4	Останні 25% записів	Пропорційне зростання
Часова	Time 12M	Транзакції за останні 12 місяців	Флуктуючий
Часова	Time 6M	Транзакції за останні 6 місяців	Флуктуючий (~5K–8,4K)
Часова	Time 4M	Транзакції за останні 4 місяці	Флуктуючий
Часова	Time 3M	Транзакції за останні 3 місяці	Флуктуючий
Лічильникова	Count 10K	Останні 10 000 записів	Фіксований
Лічильникова	Count 5K	Останні 5 000 записів	Фіксований
Лічильникова	Count 3K	Останні 3 000 записів	Фіксований

Таблиця 2

Гіперпараметри XGBoost

Параметр	<i>n_estimators</i>	<i>learning_rate</i>	<i>max_depth</i>	<i>subsample</i>	<i>colsample_bytree</i>	<i>eval_metric</i>	<i>random_state</i>
Значення	200	0.05	6	0.8	0.8	logloss	42

є некоректними. Критерій Фрідмана – непараметричний аналог дисперсійного аналізу для повторних вимірювань – перевіряє нульову гіпотезу про рівність розподілів усіх стратегій. Як міра ефекту обчислено коефіцієнт узгодженості Кендалла W [33].

Попарні тести Вілкоксона зі знаком рангів проводились для всіх 55 пар стратегій із поправкою Бонферроні; як міра ефекту – $r = Z/\sqrt{N}$, де N – кількість місяців [34]. Додатково проведено ранжування стратегій за методикою Нємені [33]: для кожного місяця стратегії ранжувалися за ROC-AUC (ранг 1 – найкращий), після чого обчислювався середній ранг за весь горизонт.

Результати та дискусії. За результатами 76-місячного преквенційного горизонту стратегія Time 6M досягла найвищих показників за шістьма з дев'яти метрик: ROC-AUC = 0,9440, PR-AUC = 0,9564, Accuracy = 0,8939, MCC = 0,7728, Brier = 0,0809 та LogLoss = 0,2732. Другу і третю позиції посіли Full History (ROC-AUC = 0,9435) та Frac 1/2 (0,9434), які статистично нерозрізненні за глобальним ROC-AUC. Найнижчі результати продемонстрували Time 12M (ROC-AUC = 0,9302) та Count 10K (0,9347). Абсолютний розмах між найкращою та найгіршою стратегією за ROC-AUC становить

0,0138 – помірна, але стабільна різниця на горизонті 76 місяців. За LogLoss розмах більш виражений: 0,0612 (Time 6M: 0,2732 проти Time 12M: 0,3344), що свідчить про суттєву відмінність у каліброваності ймовірнісних прогнозів.

Результати спростовують парадигму «More data is better». Стратегія Full History, попри доступ до понад 80 тис. записів на пізніх ітераціях, не лідирує за жодною з ключових метрик, крім Precision = 0,8975. Frac 1/2 перевершує кумулятивну стратегію за F1 (0,9167 проти 0,9146), Accuracy (0,8937 проти 0,8919), MCC (0,7724 проти 0,7686) та LogLoss (0,2753 проти 0,2818): відкидання найстарішої половини даних не лише не погіршує дискримінаційну здатність, а й покращує каліброваність і баланс точності та повноти (рис. 4).

Аналіз варіабельності щомісячних метрик виявляє два чітко розділених кластери за стабільністю. Стратегії Time 6M, Time 4M, Time 3M, Count 5K, Count 3K та Frac 1/3 характеризуються стандартним відхиленням ROC-AUC у межах 0,025–0,030 і CV $\approx$ 0,027–0,032. Стратегії Time 12M (CV = 0,063) та Count 10K (CV = 0,056) демонструють виражену дисперсію, зумовлену їхньою вразливістю до структурних збурень.

Time 6M поєднує найвищу середню якість (mean ROC-AUC = 0,9404)



Рис. 4. Теплова карта глобальних метрик якості класифікації залежно від стратегії формування навчального вікна

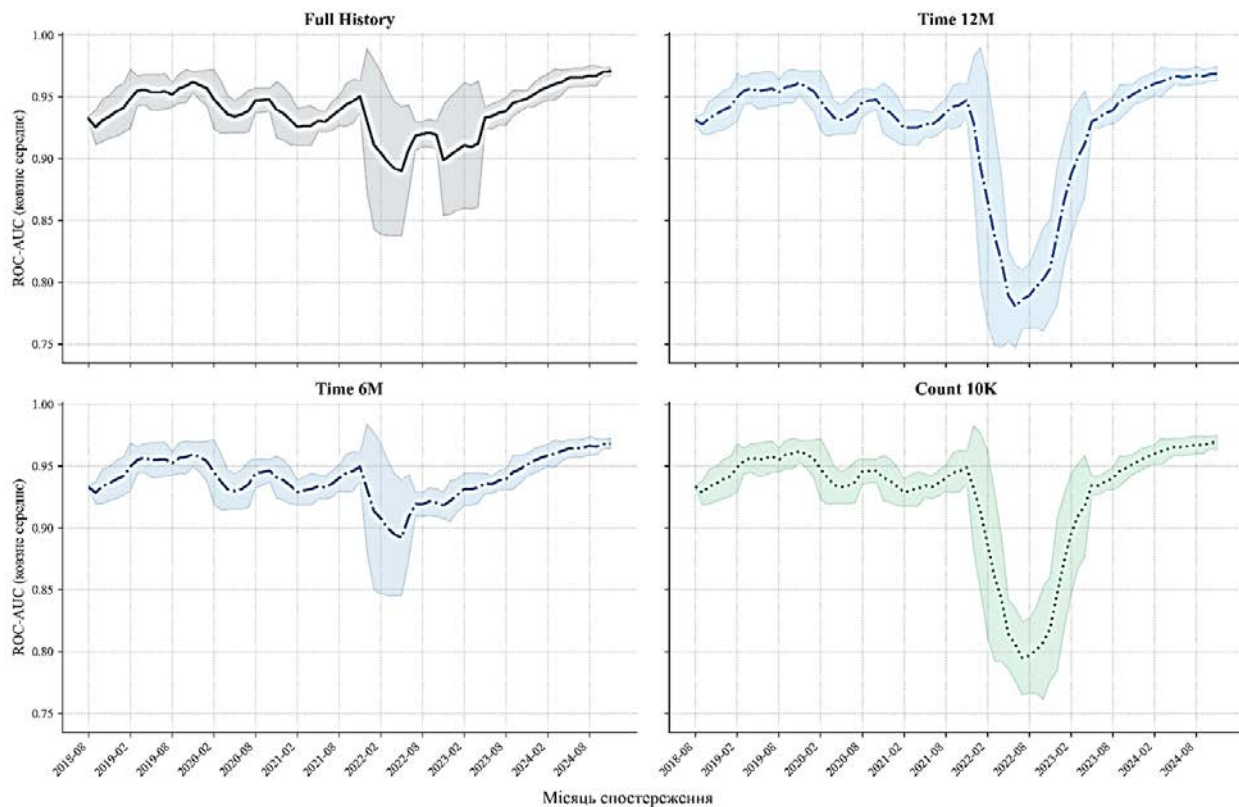


Рис. 5. Порівняння згладжених траєкторій ROC-AUC із довірчими інтервалами для ключових стратегій навчального вікна

з найменшою дисперсією серед часових стратегій ($\text{std} = 0,0253$), що визначає її оптимальність із погляду компромісу «ефективність–стабільність».

Під час макроекономічних шоків 2022 року стратегії з великим обсягом історичних даних (Time 12M, Count 10K) характеризуються екстремальним розширенням довірчого коридору, що підтверджує їх нестабільність у кризові періоди (рис. 5). Кумулятивна стратегія виявляє значну волатильність протягом 2022–2023 років унаслідок конфлікту акумульованих старих патернів із новими ринковими реаліями. Time 6M генерує найвужчий довірчий інтервал навіть у фазі кризового падіння метрик, що свідчить про її здатність до швидкої та структурно надійної адаптації.

При аналізі динаміки навчального вікна та обчислювальної ефективності стратегій отримані наступні результати (табл. 3).

Full History наприкінці горизонту оперувала вікном обсягом ~86 700 записів і потребувала 0,47 с на одне перенавчання. Time 6M за середнього вікна ~6 000 записів витрачала 0,22 с – удвічі менше. Стратегії Count 3K і Time 3M вимагали лише 0,18–0,20 с, що становить менш ніж 40% від кумулятивного варіанту. Залежність якості від обсягу вікна є нелінійною: збільшення від 3 000 до 6 000 записів (Time 3M → Time 6M)

дає приріст ROC-AUC на 0,0039 за мінімальних додаткових витрат (+0,04 с), тоді як збільшення від 6 000 до 51 000 (Time 6M → Full History) не забезпечує жодного приросту якості при більш ніж подвійному зростанні часу перенавчання. Застосування Time 6M замість Full History забезпечує скорочення розміру навчальної матриці на 50-80% на пізніх ітераціях, що відповідає принципам Sustainable/Green AI і забезпечує відчутну економію ресурсів у хмарних інфраструктурах [35].

Таблиця 3
Обчислювальна ефективність стратегій

Стратегія	Середній обсяг вікна	Середній час перенавчання, с
Full History	51 028	0,47
Frac 1/2	25 514	0,37
Frac 1/3	17 009	0,28
Frac 1/4	12 757	0,26
Time 12M	11 967	0,26
Time 6M	5 994	0,22
Time 4M	3 999	0,20
Time 3M	3 003	0,18
Count 10K	10 000	0,32
Count 5K	5 000	0,23
Count 3K	3 000	0,20

Критерій Фрідмана підтвердив наявність статистично значущих відмінностей між стратегіями: $\chi^2 = 99,89$ ($p < 10^{-16}$). Коефіцієнт узгодженості Кендалла $W = 0,131$ свідчить про малий-помірний ефект, узгоджений із невеликим абсолютним розмахом ROC-AUC між стратегіями.

Ранжування за методикою Нємені формує лідерську групу (позиції 1-4: Time 6M – ранг 4,90; Frac 1/2 – 4,96; Count 10K – 4,98; Full History – 5,11) з тісно згрупованими значеннями, що свідчить про конкурентоспроможність усіх чотирьох стратегій. Примітно, що Count 10K посідає третю позицію за рангом попри нижчий глобальний ROC-AUC завдяки високій медіані (0,9451), яку нівелюють глибокі провали у кризові місяці. Time 6M є єдиною стратегією, що лідирує як за глобальними метриками, так і за рейтинговим підходом, підтверджуючи найбільш збалансований характер.

З 55 попарних порівнянь Вілкоксона з поправкою Бонферроні 17 є статистично значущими ($\alpha = 0,05$). Найбільш виражені відмінності зафіксовано для пар: Time 6M – Time 3M ($p_{\text{corr}} < 10^{-7}$; $r = 0,711$ – великий ефект), Time 6M – Count 3K ($p_{\text{corr}} < 10^{-7}$; $r = 0,706$ – великий ефект) та Time 4M – Time 3M ($p_{\text{corr}} < 10^{-5}$; $r = 0,617$ – великий ефект).

Відмінності між лідерами (Time 6M, Frac 1/2, Full History) є статистично незначущими ($p_{\text{corr}} > 0,50$), що підтверджує їхню функціональну еквівалентність і допускає гнучкий вибір між ними залежно від обчислювальних обмежень.

Аналіз помісячної динаміки виявляє два основних кризових епізоди. У лютому-березні 2022 р. усі стратегії зазнали суттєвого зниження ROC-AUC (рис. 6). Для Full History він знизився до 0,813 (лютий) та 0,835 (березень) – відхилення на $2,8\sigma$ від середнього. Time 6M продемонструвала аналогічне зниження (0,827 та 0,838), проте відновилася до 0,915 вже у квітні 2022 р. – на місяць раніше за кумулятивну стратегію. Count 10K та Time 12M зазнали глибшого провалу і тривалішого відновлення, що пояснює їхню вищу дисперсію. У кризовому епізоді січня 2023 р. Full History зафіксувала найнижче значення за весь горизонт (ROC-AUC = 0,809), тоді як Time 6M утримала рівень 0,914. Цей епізод ілюструє ключову вразливість кумулятивної стратегії: великий обсяг застарілих патернів уповільнює адаптацію до різких зсувів розподілу.

На відміну від нейронних мереж, де проблемою є «катастрофічне забування», тобто занадто швидке витіснення раніше засвоєних знань [36], для пакетних ансамблів дерев рішень

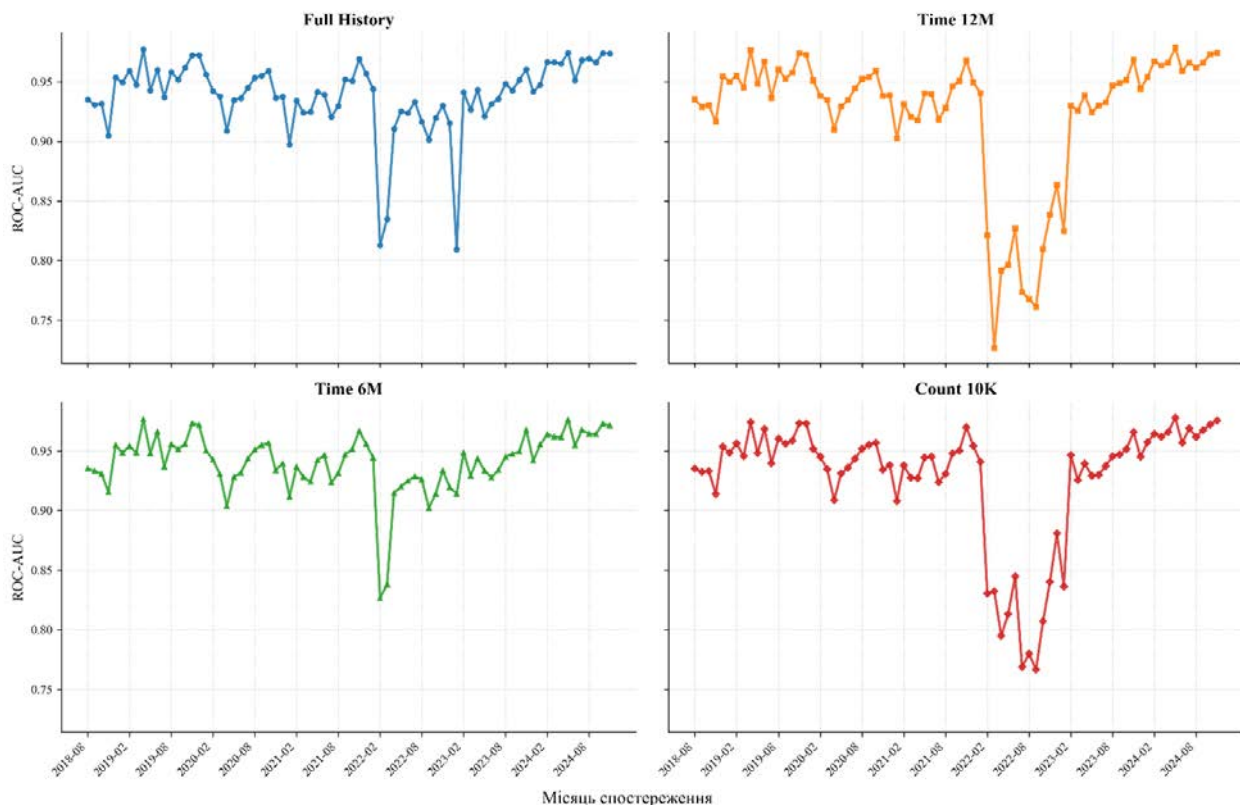


Рис. 6. Порівняння преквенційних траєкторій ROC-AUC для ключових стратегій навчального вікна в умовах кризових збурень

в умовах концептуального дрейфу спостерігається симетричний ефект надмірного збереження застарілих патернів. У рамках дилеми стабільності – пластичності [8] ці моделі тяжіють до надмірної стабільності: кумулятивні та широкі вікна примушують алгоритм зберігати вузли розгалуження, оптимізовані під нерелевантні поведінкові правила, що призводить до побудови надмірно складних «забруднених» дерев і деградації LogLoss. Пропонуємо позначати цей ефект терміном «**катастрофічне запам'ятовування**» (Catastrophic Retention). Вузлі ковзні вікна функціонують як механізм примусового витіснення застарілих концептів, дозволяючи XGBoost будувати лаконічні дерева, адекватні поточній ринковій реальності [26].

Оптимальність 6-місячного вікна є наслідком його структурного вирівнювання з фундаментальними ритмами B2B-сектору: корпоративне планування, перегляд бюджетів і тендерні процедури відбуваються з піврічною або кварталною частотою [22]. Шестимісячне вікно реалізує подвійний компроміс: обсяг у 5 000–8 400 транзакцій гарантує математичну збіжність градієнтного бустингу, одночасно виключаючи дані попереднього піврічного циклу, сформовані за іншої кон'юнктури. Вужчий горизонт (Time 3M) означає інформаційний дефіцит, ширший (Time 12M) — поглинання нерелевантних макропатернів. Лічильникові вікна при зростанні інтенсивності замовлень можуть стискатися в часі до 2–3 тижнів, спричиняючи гіперчутливість моделі та втрату здатності до генералізації; часове вікно Time 6M натомість природно масштабує абсолютний обсяг вибірки відповідно до бізнес-активності [22].

З ширшої перспективи, отримані результати спростовують парадигму «Data is an asset» стосовно предиктивного моделювання в нестационарних умовах: застарілі дані перетворюються з активу на технічний борг, що руйнує прогностичну здатність моделі [7]. Для промислових MLOps-конвеєрів механізм відсікання навчальної вибірки є фундаментальною архітектурною вимогою [19, 26]. Архітектура регулярного пакетного перенавчання з 6-місячним горизонтом є більш надійним і ресурсоефективним рішенням для ERP-систем порівняно зі складними статистичними детекторами дрейфу (ADWIN, DDM та аналогами), що вимагають моніторингу кожного потокового запису [7, 18]. Отримані результати узгоджуються з даними [23], розширюючи їхні висновки на пакетне

перенавчання XGBoost у B2B-контексті і додаючи кількісну оцінку відмінностей із статистичною верифікацією на значно більшому масиві реальних даних.

Висновки. Проведено систематичне порівняння одинадцяти стратегій формування навчального вікна для XGBoost на масиві 86 786 B2B-транзакцій реальної промислової ERP-системи протягом 76-місячного преквенційного горизонту.

Стратегія часового вікна 6 місяців (Time 6M) є оптимальною за сукупністю критеріїв: найвищий ROC-AUC (0,9440), найнижчий LogLoss (0,2732), висока стабільність (CV = 0,027), найкращий середній ранг (4,90) та помірне обчислювальне навантаження (0,22 с на цикл – удвічі менше за кумулятивну стратегію). Ефективність цього горизонту зумовлена структурним вирівнюванням із піврічними ритмами корпоративного планування: вікно одночасно захоплює актуальну ринкову динаміку та виключає нерелевантні патерни попередніх циклів.

Кумулятивна стратегія (Full History), попри максимальний обсяг навчальної вибірки, не демонструє переваг за якістю прогнозу. Деградація ROC-AUC до 0,809 в кризовому епізоді січня 2023 р. підтверджує ефект «катастрофічного запам'ятовування»: надмірне збереження застарілих патернів знижує адаптивність моделі в нестационарних умовах.

Відмінності між стратегіями є статистично значущими (критерій Фрідмана: $\chi^2 = 99,89$; ($p < 10^{-16}$); $W = 0,131$). З 55 попарних порівнянь 17 є значущими (тест Вілкоксона з поправкою Бонферроні, $\alpha = 0,05$). Стратегії з найвужчими вікнами (Time 3M, Count 3K) достовірно поступаються стратегіям із помірними вікнами, тоді як лідерська група (Time 6M, Frac 1/2, Full History) статистично нерозрізнявана, що допускає гнучкий вибір між ними залежно від обчислювальних обмежень.

Розробникам i-ERP рекомендовано впровадити стратегію 6-місячного ковзного вікна як базову архітектурну конфігурацію конвеєрів автоматичного перенавчання XGBoost-моделей. Перспективними напрямками подальших досліджень є адаптивні стратегії, що динамічно регулюють глибину навчального вікна залежно від рівня детектованого концептуального дрейфу; зважені вікна з вищим ваговим коефіцієнтом для новіших транзакцій; ансамблі, що комбінують моделі різних часових горизонтів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Grabski S. V., Leech S. A., Schmidt P. J. A Review of ERP Research: A Future Agenda for Accounting Information Systems. *Journal of Information Systems*. 2011. Vol. 25, No. 1. P. 37–78. DOI: 10.2308/jis.2011.25.1.37.

2. Jawad Z. N., Balázs V. Machine learning-driven optimization of enterprise resource planning (ERP) systems: a comprehensive review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. 2024. Vol. 13. Art. 4. DOI: 10.1186/s43088-023-00460-y.
3. Romero D., Vernadat F. Enterprise information systems state of the art: Past, present and future trends. *Computers in Industry*. 2016. Vol. 79. P. 3–13. DOI: 10.1016/j.compind.2016.03.001.
4. Zdravković M., Panetto H. Artificial intelligence-enabled enterprise information systems. *Enterprise Information Systems*. 2022. Vol. 16, No. 5. Art. 1973570. DOI: 10.1080/17517575.2021.1973570.
5. Duan Y., Edwards J. S., Dwivedi Y. K. Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data – evolution, challenges and research agenda. *International Journal of Information Management*. 2019. Vol. 48. P. 63–71. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.021.
6. Villegas-Ch G., García-Ortiz D., Luján-Mora S. Machine Learning and Deep Learning Models for Demand Forecasting in Supply Chain Management: A Critical Review. *Applied System Innovation*. 2024. Vol. 7, No. 5. P. 93. DOI: 10.3390/asi7050093.
7. Gama J., Žliobaitė I., Bifet A., Pechenizkiy M., Bouchachia A. A survey on concept drift adaptation. *ACM Computing Surveys*. 2014. Vol. 46, No. 4. P. 1–37. DOI: 10.1145/2523813.
8. Lu J., Liu A., Dong F., Gu F., Gama J., Zhang G. Learning under concept drift: A review. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2019. Vol. 31, No. 12. P. 2346–2363. DOI: 10.1109/TKDE.2018.2876857.
9. Iwashita A. S., Papa J. P. Evolving strategies in machine learning: A systematic review of concept drift detection. *Information*. 2024. Vol. 15, No. 12. Art. 786. DOI: 10.3390/info15120786.
10. Abdul Razak M. S., Nirmala C. R., Sreenivasa B. R., Lahza H., Lahza H. F. M. A survey on detecting healthcare concept drift in AI/ML models from a finance perspective. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 5. Art. 955314. DOI: 10.3389/frai.2022.955314.
11. Ditzler G., Roveri M., Alippi C., Polikar R. Learning in nonstationary environments: A survey. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2015. Vol. 10, No. 4. P. 12–25. DOI: 10.1109/MCI.2015.2471196.
12. Kraus A., van der Aa H. Machine learning-based detection of concept drift in business processes. *Process Science*. 2025. Vol. 2. P. 5. DOI: 10.1007/s44311-025-00012-w.
13. Gama J., Medas P., Castillo G., Rodrigues P. Learning with drift detection. *Advances in Artificial Intelligence – SBIA 2004 : proceedings of the 17th Brazilian Symposium on Artificial Intelligence (Sao Luis, Maranhao, Brazil, Sept. 29 – Oct. 1, 2004) / ed. by A. L. C. Bazzan, S. Labidi*. Springer, 2004. P. 286–295. (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 3171). DOI: 10.1007/978-3-540-28645-5_29.
14. Baena-García M., Del Campo-Ávila J., Fidalgo R., Bifet A., Gavalda R., Morales-Bueno R. Early drift detection method. *Proceedings of the 4th International Workshop on Knowledge Discovery from Data Streams (IWKDDs 2006)*. Berlin, 2006. P. 77–86.
15. Bifet A., Gavalda R. Learning from time-changing data with adaptive windowing. *Proceedings of the 2007 SIAM International Conference on Data Mining (SDM 2007)*. SIAM, 2007. P. 443–448. DOI: 10.1137/1.9781611972771.42.
16. Bayram F., Ahmed B. S., Kassler A. From concept drift to model degradation: An overview on performance-aware drift detectors. *Knowledge-Based Systems*. 2022. Vol. 245. Art. 108632. DOI: 10.1016/j.knosys.2022.108632.
17. Gomes H. M., Barddal J. P., Enembreck F., Bifet A. A survey on ensemble learning for data stream classification. *ACM Computing Surveys*. 2017. Vol. 50, No. 2. P. 1–36. DOI: 10.1145/3054925.
18. Suárez-Cetrulo A. L., Quintana D., Cervantes A. A survey on machine learning for recurring concept drifting data streams. *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 213. Art. 118934. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118934.
19. Software engineering for machine learning: A case study / S. Amershi et al. *Proceedings of the 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP 2019)*. IEEE, 2019. P. 291–300. DOI: 10.1109/ICSE-SEIP.2019.00042.
20. Žliobaitė I., Gabrys B. Analysis of descriptors of concept drift and their impacts. *Informatics*. 2025. Vol. 12, No. 1. Art. 13. DOI: 10.3390/informatics12010013.
21. Agrahari S., Singh A. K. Concept drift detection in data stream mining: a literature review. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34, No. 10. P. 9523–9540. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.11.006.
22. Žliobaitė I. Combining similarity in time and space for training set formation under concept drift. *Intelligent Data Analysis*. 2011. Vol. 15, No. 4. P. 589–611. DOI: 10.3233/IDA-2011-0484.
23. Kozal J., Guzy F., Woźniak M. Employing chunk size adaptation to overcome concept drift. *Journal of Universal Computer Science*. 2022. Vol. 28, No. 3. P. 249–268. DOI: 10.3897/jucs.80735.
24. Nikolaidis D., Doumpos M. Credit Scoring with Drift Adaptation Using Local Regions of Competence. *Operations Research Forum*. 2022. Vol. 3. P. 67. DOI: 10.1007/s43069-022-00177-1.
25. Webb G. I., Hyde R., Cao H., Nguyen H. L., Petitjean F. Characterizing concept drift. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2016. Vol. 30. P. 964–994. DOI: 10.1007/s10618-015-0448-4.
26. Iwashita A. S., Papa J. P. CODE: A moving-window-based framework for detecting concept drift. *Symmetry*. 2022. Vol. 14, No. 12. Art. 2508. DOI: 10.3390/sym14122508.

27. Mestiri S. Improved credit scoring model using XGBoost with Bayesian hyper-parameter optimization. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021. Vol. 11, No. 6. P. 5477–5487. DOI: 10.11591/ijece.v11i6.pp5477-5487.
28. Ashofteh A., Bravo J. M. A conservative approach for online credit scoring. *Expert Systems with Applications*. 2021. Vol. 176. Art. 114835. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114835.
29. Gama J., Sebastião R., Rodrigues P. P. On evaluating stream learning algorithms. *Machine Learning*. 2013. Vol. 90, No. 3. P. 317–346. DOI: 10.1007/s10994-012-5320-9.
30. González Hidalgo J. I., Maciel B. I. F., Barros R. S. M. Experimenting with prequential variations for data stream learning evaluation. *Computational Intelligence*. 2019. Vol. 35. P. 670–692. DOI: 10.1111/coin.12208.
31. Dawid A. P. Statistical theory: The prequential approach (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society: Series A*. 1984. Vol. 147, No. 2. P. 278–292. DOI: 10.2307/2981683.
32. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16)*. ACM, 2016. P. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.
33. Demšar J. Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. *Journal of Machine Learning Research*. 2006. Vol. 7, No. 1. P. 1–30. DOI: 10.5555/1248547.1248548.
34. Woolson R. F. Wilcoxon signed-rank test. *Wiley Encyclopedia of Clinical Trials*. 2007. DOI: 10.1002/9780471462422.eoct979.
35. Stratigakos A., Velásquez J., Johansson C. On the retraining frequency of global models in retail demand forecasting. *Machine Learning with Applications*. 2025. Vol. 19. Art. 100769. DOI: 10.1016/j.mlwa.2025.100769.
36. Overcoming catastrophic forgetting in neural networks / J. Kirkpatrick et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 114, No. 13. P. 3521–3526. DOI: 10.1073/pnas.1611835114.

REFERENCES:

1. Grabski, S. V., Leech, S. A., & Schmidt, P. J. (2011). A review of ERP research: A future agenda for accounting information systems. *Journal of Information Systems*, 25(1), 37–78. <https://doi.org/10.2308/jis.2011.25.1.37>
2. Jawad, Z. N., & Balázs, V. (2024). Machine learning-driven optimization of enterprise resource planning (ERP) systems: A comprehensive review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 13, Article 4. <https://doi.org/10.1186/s43088-023-00460-y>
3. Romero, D., & Vernadat, F. (2016). Enterprise information systems state of the art: Past, present and future trends. *Computers in Industry*, 79, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.03.001>
4. Zdravković, M., & Panetto, H. (2022). Artificial intelligence-enabled enterprise information systems. *Enterprise Information Systems*, 16(5), Article 1973570. <https://doi.org/10.1080/17517575.2021.1973570>
5. Duan, Y., Edwards, J. S., & Dwivedi, Y. K. (2019). Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data – evolution, challenges and research agenda. *International Journal of Information Management*, 48, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.021>
6. Villegas-Ch, G., García-Ortiz, D., & Luján-Mora, S. (2024). Machine learning and deep learning models for demand forecasting in supply chain management: A critical review. *Applied System Innovation*, 7(5), Article 93. <https://doi.org/10.3390/asi7050093>
7. Gama, J., Žliobaitė, I., Bifet, A., Pechenizkiy, M., & Bouchachia, A. (2014). A survey on concept drift adaptation. *ACM Computing Surveys*, 46(4), 1–37. <https://doi.org/10.1145/2523813>
8. Lu, J., Liu, A., Dong, F., Gu, F., Gama, J., & Zhang, G. (2019). Learning under concept drift: A review. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 31(12), 2346–2363. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2876857>
9. Iwashita, A. S., & Papa, J. P. (2024). Evolving strategies in machine learning: A systematic review of concept drift detection. *Information*, 15(12), Article 786. <https://doi.org/10.3390/info15120786>
10. Abdul Razak, M. S., Nirmala, C. R., Sreenivasa, B. R., Lahza, H., & Lahza, H. F. M. (2023). A survey on detecting healthcare concept drift in AI/ML models from a finance perspective. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5, Article 955314. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.955314>
11. Ditzler, G., Roveri, M., Alippi, C., & Polikar, R. (2015). Learning in nonstationary environments: A survey. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 10(4), 12–25. <https://doi.org/10.1109/MCI.2015.2471196>
12. Kraus, A., & van der Aa, H. (2025). Machine learning-based detection of concept drift in business processes. *Process Science*, 2, Article 5. <https://doi.org/10.1007/s44311-025-00012-w>
13. Gama, J., Medas, P., Castillo, G., & Rodrigues, P. (2004). Learning with drift detection. In A. L. C. Bazzan & S. Labidi (Eds.), *Advances in Artificial Intelligence – SBIA 2004* (Vol. 3171, pp. 286–295). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-28645-5_29
14. Baena-García, M., Del Campo-Ávila, J., Fidalgo, R., Bifet, A., Gavaldà, R., & Morales-Bueno, R. (2006). Early drift detection method. *Proceedings of the 4th International Workshop on Knowledge Discovery from Data Streams (IWKDDs 2006)*, 77–86.
15. Bifet, A., & Gavaldà, R. (2007). Learning from time-changing data with adaptive windowing. *Proceedings of the 2007 SIAM International Conference on Data Mining (SDM 2007)*, 443–448. SIAM. <https://doi.org/10.1137/1.9781611972771.42>

16. Bayram, F., Ahmed, B. S., & Kassler, A. (2022). From concept drift to model degradation: An overview on performance-aware drift detectors. *Knowledge-Based Systems*, 245, Article 108632. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108632>
17. Gomes, H. M., Barddal, J. P., Enembreck, F., & Bifet, A. (2017). A survey on ensemble learning for data stream classification. *ACM Computing Surveys*, 50(2), 1–36. <https://doi.org/10.1145/3054925>
18. Suárez-Cetrulo, A. L., Quintana, D., & Cervantes, A. (2023). A survey on machine learning for recurring concept drifting data streams. *Expert Systems with Applications*, 213, Article 118934. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118934>
19. Amershi, S., Begel, A., Bird, C., DeLine, R., Gall, H., Kamar, E., Nagappan, N., Nushi, B., & Zimmermann, T. (2019). Software engineering for machine learning: A case study. *Proceedings of the 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP 2019)*, 291–300. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSE-SEIP.2019.00042>
20. Žliobaitė, I., & Gabrys, B. (2025). Analysis of descriptors of concept drift and their impacts. *Informatics*, 12(1), Article 13. <https://doi.org/10.3390/informatics12010013>
21. Agrahari, S., & Singh, A. K. (2022). Concept drift detection in data stream mining: A literature review. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 34(10), 9523–9540. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.11.006>
22. Žliobaitė, I. (2011). Combining similarity in time and space for training set formation under concept drift. *Intelligent Data Analysis*, 15(4), 589–611. <https://doi.org/10.3233/IDA-2011-0484>
23. Kozal, J., Guzy, F., & Woźniak, M. (2022). Employing chunk size adaptation to overcome concept drift. *Journal of Universal Computer Science*, 28(3), 249–268. <https://doi.org/10.3897/jucs.80735>
24. Nikolaidis, D., & Doumpos, M. (2022). Credit scoring with drift adaptation using local regions of competence. *Operations Research Forum*, 3, Article 67. <https://doi.org/10.1007/s43069-022-00177-1>
25. Webb, G. I., Hyde, R., Cao, H., Nguyen, H. L., & Petitjean, F. (2016). Characterizing concept drift. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 30, 964–994. <https://doi.org/10.1007/s10618-015-0448-4>
26. Iwashita, A. S., & Papa, J. P. (2022). CODE: A moving-window-based framework for detecting concept drift. *Symmetry*, 14(12), Article 2508. <https://doi.org/10.3390/sym14122508>
27. Mestiri, S. (2021). Improved credit scoring model using XGBoost with Bayesian hyper-parameter optimization. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(6), 5477–5487. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i6.pp5477-5487>
28. Ashofteh, A., & Bravo, J. M. (2021). A conservative approach for online credit scoring. *Expert Systems with Applications*, 176, Article 114835. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114835>
29. Gama, J., Sebastião, R., & Rodrigues, P. P. (2013). On evaluating stream learning algorithms. *Machine Learning*, 90(3), 317–346. <https://doi.org/10.1007/s10994-012-5320-9>
30. González Hidalgo, J. I., Maciel, B. I. F., & Barros, R. S. M. (2019). Experimenting with prequential variations for data stream learning evaluation. *Computational Intelligence*, 35, 670–692. <https://doi.org/10.1111/coi.12208>
31. Dawid, A. P. (1984). Statistical theory: The prequential approach (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society: Series A*, 147(2), 278–292. <https://doi.org/10.2307/2981683>
32. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16)*, 785–794. ACM. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
33. Demšar, J. (2006). Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. *Journal of Machine Learning Research*, 7(1), 1–30. <https://doi.org/10.5555/1248547.1248548>
34. Woolson, R. F. (2007). Wilcoxon signed-rank test. *Wiley Encyclopedia of Clinical Trials*. <https://doi.org/10.1002/9780471462422.eoct979>
35. Stratigakos, A., Velásquez, J., & Johansson, C. (2025). On the retraining frequency of global models in retail demand forecasting. *Machine Learning with Applications*, 19, Article 100769. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2025.100769>
36. Kirkpatrick, J., Pascanu, R., Rabinowitz, N., Veness, J., Desjardins, G., Rusu, A. A., Milan, K., Quan, J., Ramalho, T., Grabska-Barwinska, A., Hassabis, D., Clopath, C., Kumaran, D., & Hadsell, R. (2017). Overcoming catastrophic forgetting in neural networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(13), 3521–3526. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611835114>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 621

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-5>

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАРЯЧОГО МЕТАЛУ

Суботін Олег Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-6095-5840

Scopus ID: 57210213880

Петрухін Ярослав Ігорович,

аспірант

Донбаської державної машинобудівної академії

ORCID ID: 0009-0002-8208-6225

Солод Юлія Анатоліївна,

викладач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0000-2350-8403

Сімкін Олександр Ісакович,

кандидат технічних наук,

професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-9939-7866

Scopus ID: 7006970867

Отримати сляб із мінімальними показниками ступеню забруднення окалиною та втратами енерго-ресурсів є актуальним завданням металургійного виробництва. Робота присвячена підвищенню якості прокату шляхом модернізації та дослідження автоматизованої системи стеження за якістю очищення поверхні сляба від первинної окалини. Це дозволить системі керування стану реалізувати адаптивний алгоритм керування параметрами гідрозбиву за результатами оцінки стану якості поверхні слябу. Для цього досліджено оптичну систему дистанційного контролю температури прокату з тепловізором в якості первинного перетворювача. Отримано розрахункові залежності, що описують зміну потужності випромінювання від довжини оптичного каналу і величини зовнішніх збурюючих факторів. Також отримано аналітичні вирази і розроблена методика розрахунку статичної характеристики тепловізора в залежності від характеристик середовища поширення оптичного сигналу і випромінювальної здатності певних марок сталей. Теоретично доведено, що діаграма випромінюваних сигналів має широку спрямованість, тому результати вимірювань практично не залежать від кута та відстані установки пристрою до об'єкту контролю. З'ясовано, що для забезпечення високої точності вимірювання температури виникає необхідність експериментальної перевірки коефіцієнтів випромінювання ряду матеріалів з метою визначення фактичної величини ослаблення енергії інформаційного сигналу, а також коригування оптимальної довжини каналу. Проведені дослідження доводять адекватність розроблених моделей і свідчать, що запропонований первинний перетворювач для контролю температури на основі тепловізора може ефективно використовуватися в системах дистанційного контролю температури прокату.

Ключові слова: прокатний стан, сляб, окалина, вимірювання температури, випромінювання, вимірювальний перетворювач, система контролю якості поверхні сляба, тепловізор, модель оптичного каналу.

Subotin Oleg, Petrukhin Yaroslav, Solod Yuliia, Simkin Oleksandr. Development and research of a measuring system for determining the temperature of hot metal

Obtaining a slab with minimal indicators of scale contamination and energy resource losses is an urgent task of metallurgical production. The work is devoted to improving the quality of rolled products by modernizing and studying the automated system for monitoring the quality of cleaning the slab surface from primary scale. This will allow the condition control system to implement an adaptive algorithm for controlling the hydraulic hammering parameters based on the results of assessing the quality of the slab surface. For this purpose, an optical system for remote

monitoring of the temperature of rolled products with a thermal imager as the primary transducer was studied. The calculated dependencies were obtained that describe the change in radiation power from the length of the optical channel and the magnitude of external disturbing factors. Analytical expressions were also obtained and a method for calculating the static characteristics of the thermal imager depending on the characteristics of the optical signal propagation medium and the emissivity of certain steel grades was developed. It was theoretically proven that the diagram of the emitted signals has a wide directivity, so the measurement results practically do not depend on the angle and distance of the device installation to the control object. It was found that to ensure high accuracy of temperature measurement, there is a need for experimental verification of the radiation coefficients of a number of materials in order to determine the actual value of the attenuation of the information signal energy, as well as to adjust the optimal channel length. The conducted studies prove the adequacy of the developed models and indicate that the proposed primary converter for temperature control based on a thermal imager can be effectively used in systems for remote temperature control of rolled metal.

Key words: rolling mill, slab, scale, temperature measurement, radiation, measuring converter, slab surface quality control system, thermal imager, optical channel model.

Вступ. Сучасні вимоги до якості прокату змушують суттєво переглянути технологію його виробництва для задоволення вимог як споживачів, так і національних інтересів держави. Зберегти конкурентоспроможність вітчизняного прокату можна підвищенням якості за рахунок впровадження сучасного автоматизованого обладнання. Одним із способів підвищення якості прокату ще на початковому етапі виробництва є видалення окалини з поверхні нагрітого металу із застосуванням системи гідрозбиву [1].

Застосування системи управління якістю прокату на етапі видалення первинної окалини з використанням високонапірного гідрозбиву передбачає регулювання ряду його параметрів: витрати та тиску води; підйому та опускання колекторів; швидкості рольгангу; включення додаткової секції гідрозбиву тощо. Це призводить до перевитрати енергоносіїв та підвищення витрат на виробництво продукції загалом [2].

На деяких виробництвах система управління прокатним станом регулює тільки швидкість рольгангу установки гідрозбиву в залежності від марки сталі, оскільки передбачається, що для різних сталей потрібен різний час на гідрозбив. У цьому випадку система керування видаленням окалини не має достатньої інформації для ефективного та якісного гідрозбиву. Це призводить до підвищеної витрати води та електроенергії без гарантії якісного видалення окалини [3].

Таким чином, отримати сляб із мінімальними показниками ступеню забруднення окалиною та втратами енергоресурсів стає актуальним завданням. Для вирішення такого завдання необхідно забезпечити систему управління інформацією про рівень забруднення окалиною поверхні слябу. Це дозволить системі керування стану реалізувати адаптивний алгоритм керування параметрами гідрозбиву (переміщення верхніх колекторів, витрата та тиск технічної води, швидкість рольгангу) за результатами оцінки стану якості поверхні слябу.

Відомо, що в залежності від товщини й ступеню покриття окалиною знижується температура теплового випромінювання слябу [2,3]. Отже, розробка та впровадження вимірювальної системи визначення температури гарячого металу дозволить отримати інформацію щодо якості слябу, а отже й кількості окалини на ньому.

Це дозволить системі керування установки гідрозбиву забезпечити її роботу при мінімальних витратах енергоносіїв та максимальному очищенні слябу від окалини за рахунок коректного формування сигналів завдання для систем керування швидкісним режимом рольгангу та подачею води.

Як практичний результат очікується підвищення якості прокату за рахунок модернізації автоматизованої системи стеження за якістю очищення поверхні слябу від первинної окалини.

Метою роботи є підвищення якості прокату шляхом модернізації та дослідження системи вимірювання температури гарячого металу.

Методи та методики дослідження. Вихідною заготовкою для прокатного листа товщиною 5...50 мм на прокатному стані є сляби товщиною 60...250 мм, шириною 1900...2800 мм і довжиною до 10000 мм, що розігріті до температури 1100...1200 °С.

Аналіз експлуатації існуючих прокатних станів [4; 5] показує, що, наприклад, у вуглецевих сталях утворюється первинна окалина у вигляді «сухого» шару, а в легованих сталях – «липкого» шару, що міцно зчеплений з поверхнею металу.

Відомо, що товщина та структура шару окалини на різних етапах процесу виробництва смугового прокату різняться, що впливає на температуру випромінювання. Так, утворення окалини в методичній печі зменшує температуру випромінювання з 1100 °С до 800 °С за рахунок товщини окалини до 3,00 мм, в чорновій кліті – з 1100 °С до 1000 °С за рахунок товщини окалини до 0,25...0,75 мм, а на гарячекатаній

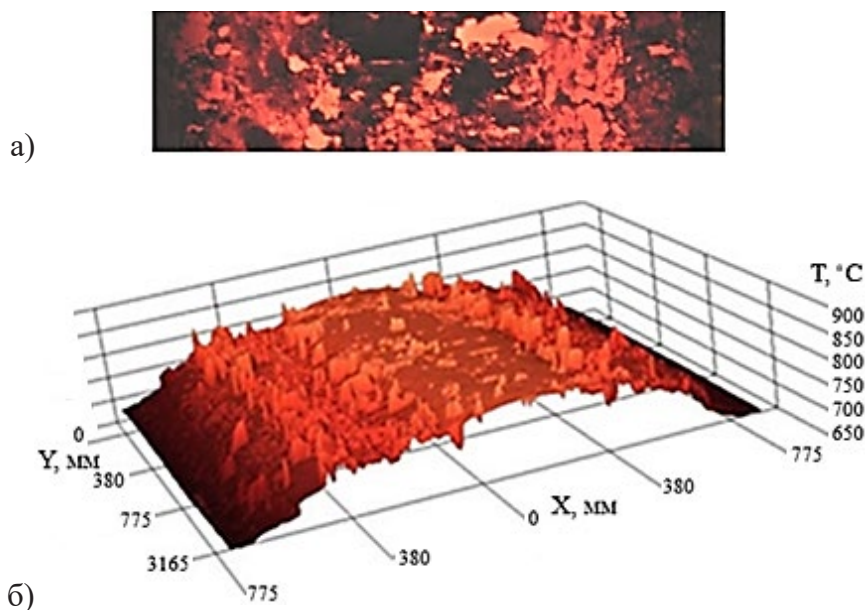


Рис. 1. Знімок ділянки поверхні слябу, ураженого окалиною (а) та розподіл температури за його поверхнею (б)

смузі – з 1100°C до 1050°C за рахунок товщини окалини до $0,10\ldots 0,35$ мм. Отже, залежно від товщини та ступеня покриття окалиною знижується температура теплового випромінювання слябу на $0\ldots 300^{\circ}\text{C}$.

При гідрозбиву відбувається видалення окалини водою, що подається на поверхню прокату через спеціальні форсунки під тиском до 60 МПа. Гідрозбив сприяє більш інтенсивному охолодженню металу при прокатці.

Вимірювання температури поверхні слябу є одним з небагатьох методів неруйнівного контролю параметрів заготівлі, що дозволяють проводити вимірювання у процесі її транспортування [6; 7].

Визначення температури поверхні металу, прихованої під шаром окалини, можливо комбінацією двох методів – методу екстраполяції та методу математичного моделювання. Суть поєднання методів полягає в скануванні температурної матриці сляба у напрямку його витягування, визначенні ділянки окалини та заміні даних на цій ділянці значеннями температури, що лінійно змінюються між значеннями на його межах. На рис.1,а наведений знімок ураженої окалиною ділянки поверхні слябу, а на рис.1,б – розподіл температури за його поверхнею.

Далі, комп'ютерною обробкою температурного знімка отримують розподіл наближеної до реальних значень температури поверхні заготівлі. Остаточо, розподіл температури по ширині сляба обчислюється шляхом усереднення її значень за довжиною на обмеженій ділянці поверхні.

На рис. 2 наведені результати розподілу температури, отримані після обробки температурного знімка за допомогою наведеної методики.

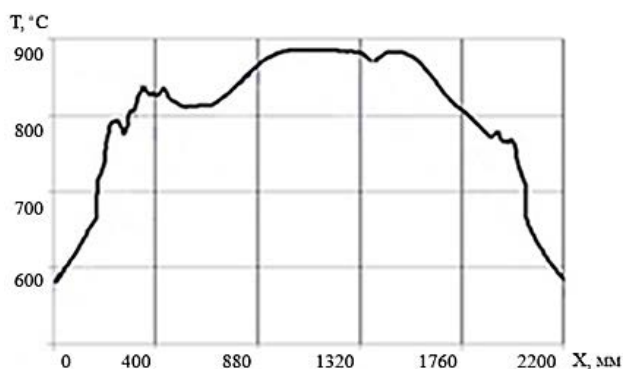


Рис. 2. Результати розподілу температури слябу за його шириною, отримані після обробки температурного знімка

У виробничих процесах досить часто виникають подібні завдання безконтактного вимірювання температури нагрітих металевих виробів. Найбільш зручними є методи визначення температури, засновані на реєстрації теплового випромінювання, що розповсюджується з поверхні нагрітого виробу. У якості вимірювального елементу зазвичай використовуються пірометри, а рідше – тепловізійна техніка [8; 9; 10].

Достовірність вимірювання температури металів понад 700°C можна забезпечити використанням високотемпературних тепловізорів [11].

Провідність металу, ступінь шорсткості поверхні та її окиснення можуть призводити до

сильної зміни спектральної залежності коефіцієнта теплового випромінювання від довжини хвилі λ порівняно з довідковими значеннями, як показано на рис. 3. В інфрачервоній ділянці спектра при довжині хвилі $\lambda > 10$ мкм коефіцієнт теплового випромінювання металів приблизно апроксимується формулою Друде (штрихові лінії на рис. 3) [12].

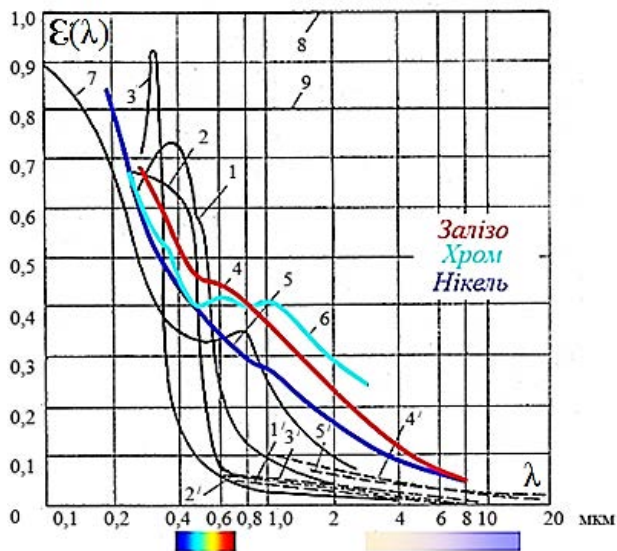


Рис. 3. Залежність спектрального коефіцієнта теплового випромінювання від довжини хвилі λ : 1,1' – мідь; 2,2' – золото; 3,3' – срібло; 4,4' – залізо; 5,5' – нікель; 6 – хром; 7 – алюміній; 8 – чорне тіло; 9 – сіре тіло

Аналіз залежності спектрального коефіцієнта теплового випромінювання від довжини хвилі λ показав, що для зменшення відносної похибки визначення істинної температури використовується спектральний діапазон, що лежить на стику видимої і ближньої інфрачервоної області спектра. У цьому діапазоні коефіцієнт випромінювання металів досить великий, що знижує вимоги до точності вимірювання порівняно з діапазоном 8...14 мкм (кольорові лінії на рис. 3) [4].

Крім товщини шару окалини треба також знати площу покриття окалиною поверхні слябу, яка визначається відповідно до розглянутої комбінованої методики. Розглянуто три сляби з різним ступенем покриття окалиною (рис. 4). Зліва направо кількість окалини на поверхні збільшується.

Для визначення площі покриття поверхні слябів окалиною прийнято метод з використанням сітки, яка програмно накладається на макет слябу (рис. 5). Тепловізор, як альтернатива, має функцію «Сигнальне забарвлення низької

температури», яка фарбуватиме області нижче заданої температури в синій колір (рис. 6).

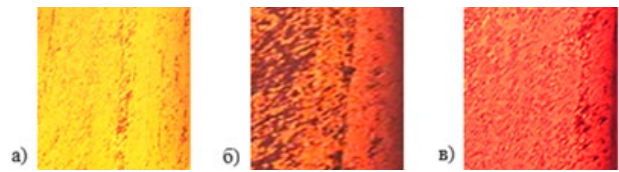


Рис. 4. Сляби з різним ступенем забруднення загальної площі слябу: а) до 15%, б) до 70%, в) до 100%

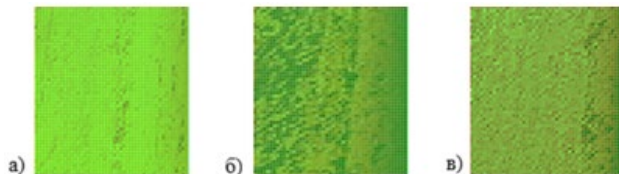


Рис. 5. Приклад накладання сітки на макети слябів з різним ступенем забруднення загальної площі слябу: а) до 15%, б) до 70%, в) до 100%

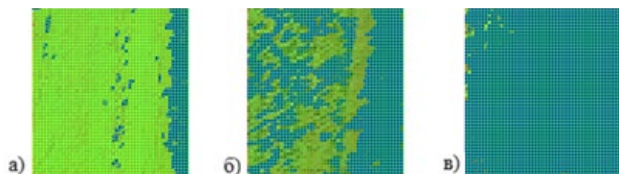


Рис. 6. Приклад роботи режиму «Сигнальне забарвлення низької температури» для визначення площі забруднення поверхні слябу окалиною: а) 11,3%, б) 60,4%, в) 94,4%

Система управління може забезпечити якість слябу зі ступенем забруднення до 5% від загальної площі – він буде взятий як еталон. Якщо площа покриття окалиною вище за еталонне значення, як показано в прикладах на рис. 6, поверхня заготовки піддається обробці гідрозбивом в залежності від кількості окалини.

Згідно з умовами експлуатації системи дистанційного вимірювання температури розігрітого металу на стані доречно застосувати промисловий тепловізор фірми FLIR серії A310, який має точність вимірювання температури до 2% та можливість передачі даних й управління з комп'ютера в режимі реального часу за допомогою спеціального програмного забезпечення. Для забезпечення необхідного класу захисту тепловізор поміщений у захисний охолоджуваний кожух. Основні технічні характеристики тепловізора наведена в табл. 1 [13].

Таблиця 1
Технічна характеристика тепловізора FLIR A310

Параметри	Величини
Діапазон температур, °C	300...2000
Живлення	по Ethernet, PoE IEEE 802.3af клас 0
Область вимірів	10 вікон з мін./макс./середнє
Спектральний діапазон, мкм	7,5...13
Діапазон робочої температури, °C	від -15 до 50
Похибка	$\pm 2^\circ\text{C}$ або $\pm 2\%$ від показань
Передача потокового відео Ethernet	MPEG-4, MPEG-4 ASP @ L5
Живлення від зовнішнього джерела,	12...24 пост. струму

При дослідженні первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) оптичного типу розглядаються, як правило, через зв'язок між вхідною величиною $x_{\text{вх}}$ і розподілом потужності світлового випромінювання $P(x)$ в конкретному середовищі розповсюдження [14].

Розрахунок розподілу потужності випромінювання в каналі розповсюдження оптичних сигналів (КРОС) з зосередженим джерелом випромінювання є дуже складною задачею, тому що потужність світлового випромінювання $P(x)$ залежить від довжини каналу (L_K), тілесного кута випромінювання ($2\rho_B$), коефіцієнта відбиття (K_B), від параметрів самого випромінювача, місця його розташування і іншого. Тому, використання тепловізора в якості первинного вимірювального перетворювача полегшує задачу його розрахунку.

Розрахункова схема тепловізора як елемента оптичної системи вимірювання температури з розосередженим джерелом випромінювання наведена на рис. 7, де прийняти наступні позначення: ДВ – джерело випромінювання, ФП – фотоприймач, КО – контрольований об'єкт, K_B – коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта, ρ_B – кут виходу променя, D – діаметр апертури лінзи, L_K , $L_{\text{П}}$ – довжина каналу та променю відповідно, X_0 – відстань від лінзи до фотоприймача.

Для тепловізора, що реалізує оптичну локацію, зручно розглядати окремо потужність відбитого прямого випромінювання $P_{\text{пр}}(x)$ і відбитого під кутом до бічної поверхні об'єкта контролю $P_{\text{кут}}(x)$, які є складовими сумарної потужності $P(x)$, що потрапляє на фото приймальний пристрій (ФП)

$$P(x) = P_{\text{пр}}^B(x) + P_{\text{кут}}^B(x). \quad (1)$$

На основі математичної моделі ПВП оптичного типу і наведених вище міркувань, розподіл потужності випромінювання в КРОС визначається виразом

$$P_{\text{пр}}^B(x) = P_0 \exp(-K_x \cdot x) K_B = I^2 \frac{S}{x^2} \exp(-K_x \cdot x) K_B, \quad (2)$$

де $K_x = \frac{1}{4\pi}$ – природні втрати в КРОС, x – довжина оптичного каналу, м.

Дещо складніше буде питання визначення потужності відбитого під кутом світлового потоку $P_{\text{кут}}(x)$.

Джерелом випромінювання є сам контрольований об'єкт, поміщений на осі, де окрема його ділянка дає пучок променів з малою апертурою – в межах кута $2\rho_B = \Omega$.

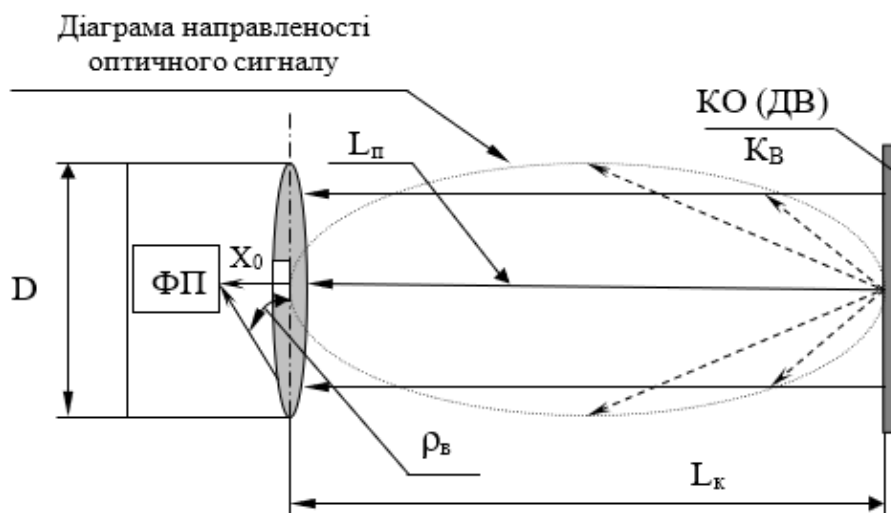


Рис. 7. Розрахункова схема тепловізора як елемента оптичної системи вимірювання температури

Будь-який об'єкт має свою величину випромінювальної здатності, яка визначається коефіцієнтом випромінювання K_B . Практично зміна K_B визначається збільшенням кута випромінювання, через що відбувається збільшення довжини шляху променю, а це призводить до часткової втрати потужності випромінювання.

Довжина шляху променю, що вийшов під кутом ρ_B до осі, дорівнює:

$$L_n = \frac{(L_k + X_o)}{\cos \rho_B} = \frac{X}{\cos \rho_B}. \quad (3)$$

Тоді зміна коефіцієнта відбиття визначається виразом:

$$\rho_{розр} = K_B \cdot \exp \left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B \right), \quad (4)$$

де $\rho_{розр}$ – розрахунковий коефіцієнт відбиття.

Тоді, досить точну для практичних розрахунків формулу для визначення потужності відбитого під кутом ρ_B світлового випромінювання можна отримати з виразу (1) з урахуванням (4).

$$P_{кут}^B(x) = P_o \exp(-K_x X) \cdot K_B \exp \left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B \right). \quad (5)$$

Тоді, для тепловізора, що реалізує оптичну локацію, сумарна потужність випромінювання, що падає на ФП, дорівнює:

$$\begin{aligned} P(x) &= P_o \exp(-K_x X) \cdot K_B + P_o \exp \left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B \right) \cdot K_B = \\ &= P_o K_B \left[\exp(-K_x X) + \exp \left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Очевидно, що основна потужність випромінювання, відбитого від поверхні об'єкта, буде зосереджена на осі оптичної системи.

Згідно розрахунковій схемі вимірювання температури з розосередженим джерелом випромінювання кут ρ_B визначається з виразу:

$$\operatorname{tg} \rho_B = \frac{D/2}{X_0}, \quad \gamma = \arctg \frac{D}{2X_0}, \quad (7)$$

де D – діаметр лінзи, м, X_0 – внутрішній оптичний канал, м.

Для випадку оптичної локації, коли джерелом випромінювання є сам контрольований об'єкт, величина X характеризує довжину шляху променю і може бути заданою на рівні L_K .

Запропонована інтерпретація математичної моделі вимірювача температури з тепловізором дозволяє провести розрахунок розподілу потужності випромінювання $P(x)$ на фотоприймачі при різних значеннях коефіцієнтів випромінювання K_B і довжини каналу, а також визначити оптимальну довжину каналу, при якій

випромінюваний оптичний сигнал буде впевнено фіксуватися на приймальному кінці перетворювача.

Таким чином, вираз (6), перетворений до виду

$$\frac{P(x)}{P_o} = K_B \left[\exp(-K_x X) + \exp \left(-K_x X \int_{\rho_B}^0 \frac{1}{\cos \rho_B} d\rho_B \right) \right] \quad (8)$$

є основним при розробці методики розрахунку перетворювача і його можна вважати рівнянням статичної характеристики тепловізора. Статична характеристика дозволяє визначити основні параметри, а також режим роботи вимірювального перетворювача температури.

Зважаючи на складність інтегральних виразів (8), що описують математичну модель тепловізора, його доцільно вирішувати чисельним методом на ПК. При цьому актуальним питанням залишається визначення фактичних значень коефіцієнтів випромінювання для матеріалів різного виду і теплового стану. Порівняння отриманих коефіцієнтів з розрахунковими дозволить перевірити адекватність запропонованої моделі.

На рис. 8 наведені залежності значення сумарної потужності $P(x)$ на фотоприймачі від загальної довжини оптичного каналу X .

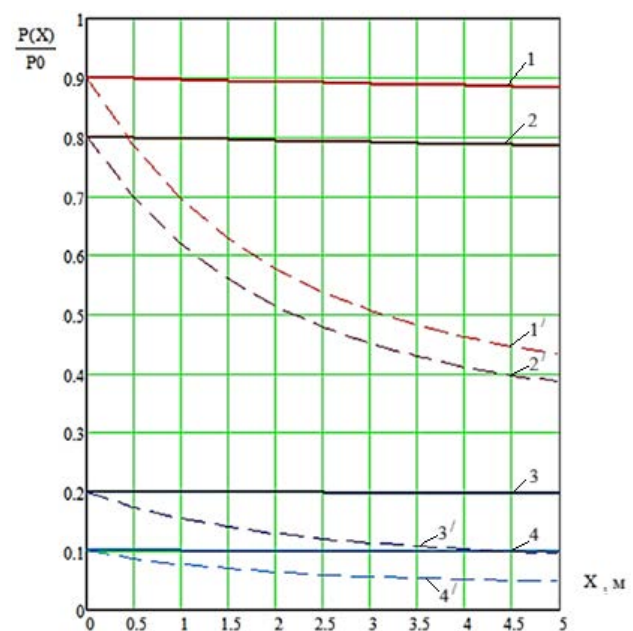


Рис. 8. Суміщені статичні характеристики вимірювальних систем з тепловізором (безперервні лінії) та пірометром (пунктирні лінії) для сталей: вуглецева (1,1'), хромонікелева (2,2'), хромиста (3,3'), жаростійка (4,4')

Розрахунки проводилися з використанням програми MathCAD. Для розрахунку прийнятий

тепловізор типу FLIR A310 з наступними параметрами: $K_x = 0.02$, $X_0 = 0.025$ м, $D = 0.03$ м. Коефіцієнти випромінювання взяті для різних марок сталей використовуваних в прокатному виробництві: окислена вуглецева сталь ($K_b = 0.87...0.9$), хромиста нержавіюча сталь ($K_b = 0.17...0.26$), хромонікелева нержавіюча сталь ($K_b = 0.72...0.88$), жаростійкі сплави ($K_b = 0.1...0.13$). Діапазони коефіцієнтів відповідають діапазону температури 800...1100 °С, що забезпечує точний вимір температури випромінювання.

Структури математичної моделі системи вимірювання температури на основі пірометра та тепловізора ідентичні. З урахуванням поправки коефіцієнта природніх втрат сигналу в оптичному каналі K_x для тепловізора замість коефіцієнта відбиття вводиться коефіцієнт випромінювання K_b .

На рис. 8 наведені суміщені статичні характеристики вимірювальних систем з тепловізором (безперервні кольорові лінії) та пірометром (пунктирні кольорові лінії) в якості вимірювального елемента. Ці характеристики представляють собою залежності відносного значення сумарної потужності $P(x)/P_0$ на фотоприймачі (вимірювальному елементі) від загальної довжини оптичного каналу X для окисленої вуглецевої сталі з $K_b = 0.9$, хромистої нержавіючої сталі з $K_b = 0.2$, хромонікелевої нержавіючої сталі 0X18H10 з $K_b = 0.8$ та жаростійкого сплаву з $K_b = 0.1$. Значення потужності P_0 відповідає максимальній потужності випромінюванню при $X = X_0$.

Результати дослідження математичної моделі системи вимірювання з тепловізором показують, що на відстані візування нагрітого об'єкту 5 м втрата потужності сигналу не перевищує 2% (відповідає технічним характеристикам обраного тепловізора). При цьому в моделі

з пірометром при тих самих умовах роботи приладу потужність падає на 50%.

На основі моделювання формується база коефіцієнтів випромінювання відповідних марок сталей, що прокочуються. База даних використовується системою для вибору потрібного значення коефіцієнта випромінювання для коректної роботи тепловізора [15].

У програму системи управління також занесена залежність ступеня покриття слябу окалиною (V , %) від площі покриття окалиною (S , мм²), та залежність товщини шару окалини (M , мм) від мінімальної температури (T_{min} , °С), як показано на рис. 9,а та рис 9,б відповідно. Як правило, товщина шару окалини варіюється в межах 0...3 мм, а температура теплового випромінювання – в межах 1100...800°С.

Сумарна площа всіх зачищених ділянок на одному листі повинна бути не більше 2% його площі (ДСТУ 8803:2018) [16]. За зразок приймається сляб зі ступенем покриття окалиною до 5% загальної площі заготівлі.

Після обробки сляба в першій секції установки гідрозбиву вихідний тепловізор реєструє температуру теплового випромінювання та обчислює ступінь покриття окалиною та її товщину. У разі, якщо $V > 35\%$ та $M < 1,5$ мм, то включається програма обробки слябу попереднього режиму, але зняття окалини відбувається вже у додатковій секції установки.

Результати та дискусії. Статична характеристика вимірювального перетворювача з тепловізором відповідає аналогу з пірометром, що підтверджує адекватність проведених розрахунків. Але результати досліджень та моделювання для системи вимірювання температури з тепловізором показали її суттєві відмінності.

Результати вимірювання системи на основі тепловізора не залежать від кута візування.

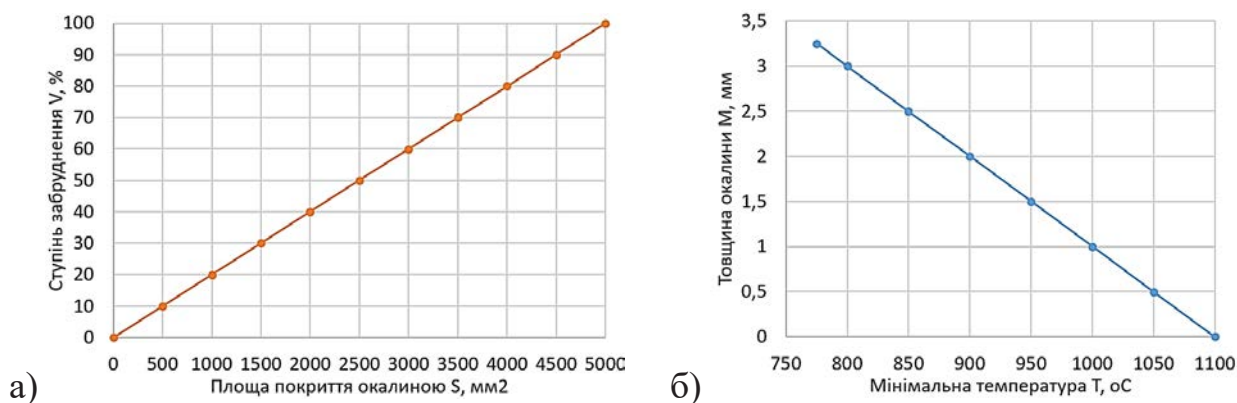


Рис. 9. Графіки залежності ступеня покриття слябу окалиною від площі забруднення (а) та товщини шару окалини від температури (б)

Перетворювач реєструє спектральне випромінювання – хвилі різної довжини та кольору, які випромінює сам об'єкт. Тому, на відміну від системи вимірювання з пірометром, діаграма зміни потужності сигналу на фотоприймачі $P(x)/P_0$ від кута випромінювання відсутня [4; 14].

Згідно з параметрами тепловізора, похибка вимірювання не перевищує $\pm 2\%$ від показань, що дорівнює модельній точності роботи системи.

Можна зробити висновок, що зменшення коефіцієнта випромінювання ніяк не позначається на потужності (якості зображення), що реєструється тепловізором.

Висновки. На підставі наведених досліджень процесів прийому оптичних сигналів отримано розрахункові залежності, що описують зміну потужності випромінювання від довжини оптичного каналу та коефіцієнта випромінювання. Це дозволило розробити методику розрахунку статичної характеристики системи вимірювання температури на основі тепловізора залежно від характеристик середовища розповсюдження оптичного сигналу та випромінювальної здатності певних марок сталей. Отримані результати дозволяють визначити оптимальну довжину оптичного каналу (загалом або для конкретного виду матеріалу й виробу) для отримання максимальної достовірності контролю.

Теоретичні дослідження показали, що діаграма випромінюваних сигналів має широку спрямованість, оскільки тепловізор фіксує спектральне випромінювання. Отже, результати

вимірювань практично не залежать від кута та відстані установки пристрою. Відстань до об'єкта контролю обмежується тільки роздільною здатністю камери. Натомість для забезпечення високої точності вимірювання температури виникла необхідність експериментальної перевірки коефіцієнтів випромінювання ряду матеріалів з метою визначення фактичної величини ослаблення енергії інформаційного сигналу, а також коригування оптимальної довжини каналу.

Тепловізор має вбудовані фільтри для поліпшення якості зображення (на пропускання атмосфери й оптики та їх прозорість, на часткове відображення, на видимому відбиту температуру, тощо), що підвищує його стійкість до перешкод й позитивно впливає на точність контролю температури. Тобто, перетворювач практично нечутливий до перешкод будь-якого типу.

Проведені дослідження доводять адекватність розроблених моделей і свідчать, що розроблений первинний перетворювач для контролю температури на основі тепловізора може ефективно використовуватися в системах дистанційного контролю температури прокату.

Також він може бути використаний як первинний перетворювач в інформаційних системах контролю та адаптивних системах управління технологічними процесами холодної та гарячої прокатки чорних та кольорових металів, здійснювати контроль наявності заготовок на будь-яких технологічних лініях та в термічних установках на тлі інтенсивних оптичних та електромагнітних перешкод різної природи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Суботін О.В. Інформаційне забезпечення систем управління прокатних станів. International scientific conference "MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education": conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2023. Vol. 2. Pp. 68-71. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-102>.
2. Миронов К.А., Дмитрієнко О.В. Способи енергозбереження в пристроях для гідрозбивання окалини. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: "Гідравлічні машини та гідроагрегати"*. № 2, 2022. С. 45-48. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2022.2.07>.
3. Ієвлев М.Г., Корбут В.Б. Енергозберігаюча автоматизована система гідрозбивання окалини для стана гарячої прокатки. *Науково-технічна інформація*. 2012. № 1 (51). С.44-48.
4. Суботін О.В. Підвищення достовірності контролю технологічних параметрів і швидкодії інформаційно-вимірювальних систем прокатних станів: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: 05.11.16. Донецьк, 2000. 216 с.
5. George Kelk Corporation. KELK Sensors for Rolling Mills. Description and Specifications. Ontario, Canada, 1998.
6. Бондаренко О. Г. Визначення інформативних параметрів та обґрунтування правила порогової ідентифікації дефектів у тепловому неруйнівному контролі. *Методи та прилади контролю якості*. № 2 (51), 2023. С. 5-15. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2023-2\(51\)-5-15](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2023-2(51)-5-15).
7. Акуленко О. С. Система дистанційного моніторингу температури на основі пірометрів із автоматичною передачею даних для подальшого аналізу : магістерська дис. : 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Київ, 2024. 142 с. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71871>.
8. Неня О.В. Сучасні тепловізори для спеціального та повсякденного застосування. Сучасна спеціальна техніка. 2016. № 4. С. 108-120.
9. Озогович А., Панчук О. Методи і засоби вимірювання розподілу температури. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2017. Том 78. С. 34-41.
10. Юзьвак О. О. Автоматизована тепловізійна система для моніторингу стану підземних тепломереж: магістерська дис.: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Київ, 2024. 96 с.

11. Сергеева К.О. Вимірювання температури сталі у конвертері. *Металознавство та обробка металів*. 2010. № 1. С. 36-38. URL: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/63617>.
12. Ashcroft N.W., Mermin N.D. Solid state physics. Cengage Learning. 2022.
13. Стационарные тепловизионные камеры Flir A310 для мониторинга температур у виробничих процесах. Електронний ресурс. URL: <https://www.flir.kiev.ua/ua/flir-a310.html>.
14. Subotin O. Photoelectric measuring transducers in environmental and objects monitoring systems. In book: Teaching and subjects on bio-medical engineering. Approaches and experiences from the BIOART-project / O. Subotin, V. Rudenko, A. Cherniavskiy, A. Kovalenko, S. Dobriak. Leuven, 2021. Pp. 64-85. ISBN 978-94-641-4245-7.
15. Subotin O.V., Petrukhin Ya.I., Liuta A.V., Novikov D.S. Information-measuring systems for monitoring the technological parameters of rolling mills. *Scientific World Journal*, 2026, № 35-01, pp. 186-198. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2026-35-01-089>
16. ДСТУ 8803:2018. Прокат товстолстовий з вуглецевої сталі звичайної якості. Київ. 2018. 54 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78625

REFERENCES:

1. Subotin, O.V. (2023). Informatsiyne zabezpechennya system upravlinnya prokatnykh staniv [Information security of rental management systems]. International scientific conference "MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education": conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvija: "Baltija Publishing". Vol. 2. P. 68-71 [in Ukrainian].
2. Mironov, K.A., Dmytrienko, O.V. (2022). Sposoby enerhozbezrezheniya v prystroyakh dlya hidrozbyvannya okalyny [Energy saving methods in devices for hydro-scaling]. *Hydraulic machines and hydraulic units*. №. 2. Pp. 45-48 [in Ukrainian].
3. Iyevlyev, M.H., Korbut, V.B. (2012). Enerhozberihayucha avtomatyzovana systema hidrozbyvannya okalyny dlya stana haryachoyi prokatky [Energy-saving automated slag hydro-beating system for hot rolling mill]. *Naukovo-tekhnichna informatsiya*. № 1 (51). Pp. 44–48 [in Ukrainian].
4. Subotin, O.V. (2000). Pidvyshchennya dostovirnosti kontrolyu tekhnolo-hichnykh parame-triv i shvydkodiyi informatsiyno-vymiryuval'nykh system pro-katnykh staniv: dys. na здобуття наукового ступеня канд. tekhn. nauk: 05.11.16 [Increasing the reliability of control of technological parameters and the speed of information and measuring systems of rolling mills: dissertation for the degree of candidate of technical sciences: 05.11.16]. Donetsk, 216 s. [in Ukrainian].
5. George Kelk Corporation (1998). [KELK Sensors for Rolling Mills]. Description and Specifications. Ontario, Canada.
6. Bondarenko, O. G. (2023). Vyznachennya informatyvnykh parametriv ta obgruntuvannya pravyla porohovoyi identyfikatsiyi defektiv u teplovomu neruynivnomu kontroli [Determination of informative parameters and justification of the rule of threshold identification of defects in thermal non-destructive testing]. *Methods and devices of quality control*. No. 2 (51). Pp. 5-15 [in Ukrainian].
7. Akulenko, O.S. (2024). Systema dystantsiynoho monitorynhu temperatury na osnovi pirometriv iz avtomatychnoyu peredacheyu danykh dlya podal'shoho analizu : mahisters'ka dys. : 174 Avtomatyzatsiya, komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi ta robototekhnika [Remote temperature monitoring system based on pyrometers with automatic data transfer for further analysis: Master's thesis: 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics]. Kyiv. 142 p [in Ukrainian].
8. Nenyta O.V. (2016). Suchasni teplovizory dlya spetsial'noho ta povsyakdennoho zastosuvannya [Modern thermal imagers for special and everyday use]. *Modern special equipment*. No. 4. P. 108-120.
9. Ozogovych A., Panchuk O. (2017). Metody i zasoby vymiryuvannya rozpodilu temperatury [Methods and means of measuring temperature distribution]. *Measuring equipment and metrology*. Vol. 78. P. 34-41.
10. Yuzvak O. O. (2024). Avtomatyzovana teploviziynna systema dlya monitorynhu stanu pidzemnykh teplomerezh: mahisters'ka dys.: 174 Avtomatyzatsiya, komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi ta robototekhnika [Automated thermal imaging system for monitoring the condition of underground heating networks: master's thesis: 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics]. Kyiv, 96 p.
11. Sergeyeva, K.O. (2010). Vymiryuvannya temperatury stali u konverteri [Measuring the temperature of steel in a converter]. *Metallurgy and metal processing*. No. 1. P. 36-38 [in Ukrainian].
12. Ashcroft, N. W., Mermin, N. D. (2022). [Solid state physics]. Cengage Learning.
13. Flir (2026). Flir A310 stationary thermal imaging cameras for monitoring temperatures in production processes. <https://www.flir.kiev.ua/ua/flir-a310.html>. Accessed 10 Apr 2026.
14. Oleg Subotin, Vladislav Rudenko, Anton Cherniavskiy, Andriy Kovalenko, Serhii Dobriak (2021). [Photoelectric measuring transducers in environmental and objects monitoring systems]. In book: Teaching and subjects on bio-medical engineering. Approaches and experiences from the BIOART-project. Pp. 64-85.
15. Subotin, O.V., Petrukhin, Ya.I., Liuta, A.V., Novikov, D.S. (2026). [Information-measuring systems for monitoring the technological parameters of rolling mills]. *Scientific World Journal*. № 35-01. Pp. 186-198. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2026-35-01-089>.
16. DSTU 8803:2018. Prokat товстолстовий з вуглецевої сталі звичайної якості [Rolled thick sheets of carbon steel of ordinary quality]. Kyiv. 2018. 54 p.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 10.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

UDC 004.932.2:004.8:616-073.75

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-6>

PNEUMOTHORAX SEGMENTATION ON CHEST X-RAYS: PROGRESSIVE FINE-TUNING AND THRESHOLD-BASED PREDICTION REFINEMENT

Tanasuik Dmytro Olehovich,

PhD Student at the Department of Automation of Production Processes

Donbass State Engineering Academy

ORCID ID: 0009-0005-3413-3324

Razzhyvin Oleksii Valeriiovych,

PhD in Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes

Donbass State Engineering Academy

ORCID ID: 0000-0002-1371-2651

Pneumothorax segmentation on chest radiographs remains a critical challenge for computer-aided triage, as small pleural separations are difficult to reliably localize. This study presents a segmentation method based on a U-Net-style deep neural network with a pretrained convolutional encoder, progressively fine-tuned on the SIIM-ACR Pneumothorax dataset. Training utilizes a two-stage resolution approach – starting at 512×512 for stable localization, then refining at 1024×1024 to recover thin pleural boundaries. Optimization incorporates staged encoder unfreezing, cyclic learning-rate scheduling, and a loss curriculum transitioning from weighted binary cross-entropy to soft Dice and symmetric Lovasz objectives.

The experimental analysis is conducted in three stages. First, three encoder backbones (ResNet34, EfficientNet, and SE-ResNeXt-50) are compared. Second, the best-performing backbone is evaluated across confidence thresholds to determine the optimal threshold-only operating point. Third, the model is assessed under joint confidence-threshold and minimum-mask-size control, where excessively small predicted masks are reset to empty. This structure reflects the SIIM-ACR evaluation protocol, where correct empty-mask predictions on negative studies heavily impact the overall mean Dice score.

Results identify SE-ResNeXt-50 as the strongest backbone. While a 0.70 confidence threshold maximizes threshold-only performance, the strongest overall result is achieved by combining a 0.55 confidence threshold with a minimum positive-pixel threshold of 2000. These findings demonstrate that explicit operating-point design – converting continuous probability maps into binary clinical decisions – is essential for pneumothorax segmentation and should be reported alongside architecture and training methodologies.

Key words: pneumothorax, chest radiography, medical image segmentation, U-Net, SE-ResNeXt-50, confidence threshold, post-processing.

Танасюк Дмитро, Разживін Олексій. Сегментація пневмотораксу на рентгенограмах грудної клітки: прогресивне донавчання та удосконалення прогнозу на основі порогової обробки

У статті розглянуто практичний підхід до сегментації пневмотораксу на рентгенограмах органів грудної клітки з використанням згорткової архітектури нейронної мережі типу U-Net із попередньо натренованим енкодером. Оскільки рентгенографія залишається найдоступнішим методом візуалізації, а виявлення невеликих колапсів легень є складним навіть для фахівців, розробка таких систем є вкрай актуальною. Запропонована методика поєднує поетапне донавчання моделі з прогресивною зміною просторової роздільної здатності від 512×512 до 1024×1024. Процес оптимізації включає поступове розморожування енкодера нейронної мережі, циклічний графік швидкості навчання та послідовне застосування функцій втрат: weighted binary cross-entropy, soft Dice і symmetric Lovasz.

Експериментальне дослідження організовано у три послідовні етапи. Спочатку за однакової схеми навчання порівнюються три варіанти архітектури нейронних мереж (енкодери): ResNet34, EfficientNet та SE-ResNeXt-50. На другому етапі для найкращої архітектури аналізується залежність якості сегментації від порога бінаризації карти ймовірностей. На третьому етапі модель оцінюється за спільного контролю порога впевненості та мінімальної кількості позитивних пікселів, де занадто малі маски примусово скидаються до порожніх. Це відображає специфіку протоколу оцінювання SIIM-ACR, у якому правильне передбачення порожньої маски для негативних випадків має вирішальний вплив на підсумковий показник Dice.

Результати доводять, що серед розглянутих варіантів SE-ResNeXt-50 забезпечує найкращий баланс. В аналізі лише за порогом упевненості оптимальним є значення 0.70. Проте найкращий підсумковий результат досягається за комбінованої схеми: поріг упевненості 0.55 разом із мінімальним порогом позитивних пікселів 2000. Це ефективніше пригнічує хибнопозитивні дрібні області, не погіршуючи сегментацію значущих випадків. Отримані дані свідчать, що вибір робочої точки є невід'ємною складовою алгоритму сегментації, яку необхідно звітувати нарівні з архітектурою та деталями навчання.

Ключові слова: пневмоторакс, рентгенографія органів грудної клітки, сегментація медичних зображень, U-Net, SE-ResNeXt-50, робоча точка, поріг впевненості, післяобробка.

Introduction. Pneumothorax is a clinically significant condition in which air accumulates in the pleural cavity and may lead to partial or complete lung collapse. In emergency and routine radiological practice, chest radiography remains one of the fastest and most accessible diagnostic tools, yet subtle cases are often difficult to identify because the main visual marker may be represented only by a thin displaced pleural line. This creates an important practical task for computer vision systems that can assist with localization and segmentation of pneumothorax regions on chest radiographs [1; 2].

The SIIM-ACR Pneumothorax Segmentation Challenge further highlighted the applied relevance of this task by establishing a large benchmark dataset and an evaluation protocol in which correct prediction of an empty mask on a negative study is rewarded with the maximum case-level score [1; 2]. Consequently, the final quality of a segmentation system depends not only on the network architecture and training strategy, but also on the decision rule used to transform a continuous probability map into a binary mask. This makes the problem relevant both from the viewpoint of medical image segmentation and from the viewpoint of practical deployment of diagnostic support systems.

From an applied perspective, the task is difficult not only because of the visual subtlety of many positive cases, but also because the clinically relevant target is structurally atypical for standard semantic segmentation. Pneumothorax often forms a thin peripheral region adjacent to the pleural boundary rather than a large compact object in the center of the image. As a result, minor errors in confidence distribution may change the binary decision from a plausible contour to an empty mask or vice versa. This characteristic makes the problem especially sensitive to the interaction between training loss, resolution, and inference thresholding, and partly explains why challenge solutions often combined conventional encoder–decoder models with carefully tuned decision rules [2; 3].

Analysis of recent research and publications.

U-Net-like encoder–decoder architectures remain a widely used basis for medical image segmentation and have also shown strong performance for pneumothorax segmentation on chest radiographs [4; 6]. In the SIIM-ACR context, practical systems have combined U-Net decoders with pretrained backbones such as ResNet, EfficientNet, and SE-ResNeXt, while challenge-winning solutions often relied on ensembling, staged optimization, and carefully tuned post-processing [2; 3; 4].

Another important research direction concerns the choice of objective functions and structural

priors. Overlap-oriented losses such as Dice and Lovasz-based surrogates have been used to improve region consistency, whereas boundary-aware formulations have been proposed specifically because pneumothorax contours on chest radiographs are thin, blurred, and difficult to delineate accurately [5]. Recent works also investigate two-stage solutions, anatomical priors, and segmentation-based quantification of pneumothorax extent [6; 7].

At the same time, previous studies and challenge reports indicate that the transition from probability map to final binary mask is a substantial part of the system rather than a minor technical detail. Confidence thresholding, area suppression, and multistep post-processing have repeatedly been used to reduce clinically implausible false positives and to adapt model behavior to the evaluation metric [2; 3]. However, the contribution of these operating-point choices is not always analyzed separately from the contribution of the backbone architecture or the loss function. This leaves insufficiently studied the question of how architectural selection, threshold-only control, and threshold-plus-area control interact within one unified experimental design.

This observation reveals an important methodological gap. Architectural comparison alone does not fully explain final performance when the evaluation metric itself couples segmentation quality with image-level false-positive control. In practical terms, two models with similar probability maps may behave differently after binarization, and one of them may obtain a better final Dice score simply because it produces fewer weak positive activations on negative studies. For pneumothorax segmentation, this means that the experimental logic should include not only the network backbone and loss design, but also the mechanism by which continuous outputs are converted into final binary masks [1; 2].

Research purpose. The purpose of this study is to substantiate a practical method for pneumothorax segmentation on chest radiographs and to determine how its final quality is influenced by three successive design choices: encoder backbone selection, confidence-threshold selection, and joint confidence-threshold and minimum-mask-size selection. The study aims to identify the strongest backbone under a common training framework, to establish the best threshold-only operating point for the selected model, and to determine the best final configuration after adding positive-pixel suppression.

Basic material presentation. The experiments are performed on the SIIM-ACR Pneumothorax

Segmentation dataset [1; 2]. The original run-length encoded annotations are grouped at the image level and transformed into binary masks aligned with 1024×1024 chest radiographs. A stratified train/validation/test split is used so that positive and negative studies remain reasonably balanced across subsets. Specifically, the training subset comprises 8643 images (6719 negative and 1924 positive cases). The validation subset, utilized for hyperparameter tuning and operating-point selection, contains 964 images (747 negative and 217 positive cases). Finally, the held-out test subset, reserved strictly for final performance reporting, includes 1068 images (830 negative and 238 positive cases). This explicit stratification guarantees a consistent proportion of positive to negative examinations across all experimental phases, preventing disproportionate concentrations of either subtle pneumothoraces or obvious empty cases in any single subset. All model selection steps, including backbone selection and operating-point tuning, are performed using the training and validation data, whereas the final numerical results are reported on the held-out test split.

Preprocessing and augmentation. Input images are normalized using dataset-specific channel statistics. Although the underlying data are chest radiographs, the network operates on three-channel inputs so that pretrained convolutional encoders can be used without changing their first-layer structure. Training-time augmentation includes geometric perturbations based on translation, scaling, and rotation, together with low-probability intensity transformations such as contrast, gamma, and brightness adjustment. Such augmentation is deliberately moderate and is intended to improve robustness without introducing unrealistic radiographic patterns.

Although the underlying modality is grayscale, representing the radiographs as three-channel inputs is a practical compromise that allows direct use of pretrained natural-image encoders without reinitializing the first convolutional layer. In this setting, the gain does not come from color information, which is absent, but from transfer of low-level edge, contrast, and texture detectors into the medical domain. The augmentation policy is intentionally conservative. Horizontal flipping is avoided because left–right reversal may distort clinically meaningful asymmetries, and overly aggressive photometric augmentation could alter the delicate pleural edge contrast that distinguishes subtle pneumothorax from normal lung boundary. Instead, the augmentation strategy focuses on moderate geometric perturbation and restrained intensity variation to improve robustness while preserving radiographic plausibility.

Network architecture. The base segmentation model is an encoder–decoder network with a U-Net-style decoder and skip connections from intermediate encoder stages. The decoder combines upsampling, lateral feature fusion, and convolutional refinement, while the network outputs a single logit map converted to probabilities by the sigmoid function. Within this common design, three encoder families are investigated: ResNet34, EfficientNet, and SE-ResNeXt-50. Their comparison is intended to determine which feature extractor provides the best balance between localization quality on positive studies and stability on negative studies [3; 4].

Within this architecture, the encoder and decoder fulfill different functional roles. The pretrained backbone acts as a hierarchical feature extractor that progressively aggregates large-scale contextual information, while the decoder reconstructs spatial detail from semantically enriched feature maps. This separation is particularly useful in chest radiography, where the model must distinguish true pleural separation from a wide range of confounders, including rib edges, overlapping soft tissue, acquisition artifacts, and chest tubes. The skip connections allow local boundary cues to remain accessible during upsampling, while the deeper encoder features help suppress anatomically implausible responses. The comparison among ResNet34, EfficientNet, and SE-ResNeXt-50 therefore reflects more than computational preference; it also tests different trade-offs between feature diversity, representation depth, and robustness of transferred pretrained filters.

Optimization strategy and 512×512 warm start. Training is organized as a progressive fine-tuning procedure. The first stage is performed at 512×512 resolution and serves as a computationally efficient warm start. At this stage, the model can be optimized with larger effective batch sizes and greater stability, while already learning the large-scale distinction between empty and non-empty studies and the approximate localization of pleural abnormalities. The 512×512 stage is therefore not merely a technical simplification, but a regularized initialization phase that prepares both decoder and upper encoder blocks for subsequent high-resolution refinement.

The first 512×512 stage can be viewed as a task-specific pretraining phase carried out within the target dataset. Its purpose is not to produce the final operating model, but to place the parameters into a stable basin before full-resolution optimization. At this scale, the model learns coarse localization of pleural abnormalities, adapts the decoder to the radiographic domain, and begins to calibrate the relationship between positive and

negative studies. The reduced computational burden makes it possible to train with a larger effective batch size and more frequent parameter updates, which is especially helpful when the backbone is being progressively unfrozen. In this sense, the 512×512 stage provides both optimization stability and a regularizing effect: the model first learns where the disease is likely to appear before being asked to resolve the exact contour at 1024×1024 .

After this warm start, the model is fine-tuned at full 1024×1024 resolution. The higher resolution is necessary because pneumothorax boundaries may be represented as thin peripheral structures that are under-resolved at smaller scales. Encoder unfreezing is staged: first, only a limited subset of layers is trainable, and then progressively deeper encoder blocks are released. This reduces instability and allows the decoder to adapt before all backbone parameters are updated jointly.

The transition to 1024×1024 is essential for the final stage because clinically relevant pneumothorax contours are often only a few pixels wide after downsampling. A model trained only at reduced resolution may identify the general region of abnormality, yet still blur the boundary or produce fragmented low-confidence regions near the pleura. Full-resolution training restores the spatial granularity needed for more realistic contour formation. It also changes the optimization problem: at high resolution, the network must simultaneously maintain global contextual understanding and refine a sparse, elongated target embedded in a very large background. This is one reason why the earlier warm-start phase is useful; by the time full-resolution refinement begins, the model has already learned a stable global representation of the task and can dedicate more capacity to spatial precision.

Optimization uses Adam together with a cyclic learning-rate schedule of triangular type and, where required, gradient accumulation. In this schedule, the learning rate increases from a base value to a maximum value and then decreases again over a fixed epoch cycle. During early adaptation, such oscillation helps newly trainable layers escape poor local minima without relying on an overly aggressive constant learning rate. During later stages, it enables controlled refinement in a low-learning-rate regime. In practice, wider cycles and larger learning-rate amplitudes are used earlier, whereas narrower, gentler cycles are used during full-resolution fine-tuning.

In practical optimization terms, the triangular cycle avoids two opposite failure modes. A uniformly low learning rate can make later-stage fine-tuning too conservative, especially after additional

encoder blocks are unfrozen, whereas a uniformly high learning rate may destabilize already useful pretrained representations. By repeatedly increasing and decreasing the learning rate within controlled bounds, the schedule encourages periodic exploration without abandoning the fine-grained structures already learned. This behavior is particularly helpful when different loss functions are introduced across stages, because the objective landscape changes as the model moves from pixelwise calibration to overlap-oriented refinement. The cycle therefore acts as a transition mechanism between stages of the curriculum rather than only as a generic optimization heuristic.

Loss functions. The optimization objective is also staged. Weighted binary cross-entropy is used early to compensate for the strong foreground-background imbalance inherent in pneumothorax segmentation. By assigning more influence to positive pixels, this loss helps the model learn stable coarse localization before boundary quality becomes reliable. Soft Dice is introduced in later stages to emphasize overlap quality at the object level and to reduce domination by the large number of easy background pixels. In the final phase, symmetric Lovasz loss is used to align optimization more closely with set-based overlap behavior. Together, these losses form a curriculum: first the network learns to distinguish foreground from background, then it improves mask overlap, and finally it refines difficult pixel-ordering errors affecting the contour [4; 5].

The interaction among the three losses is complementary rather than redundant. Weighted binary cross-entropy provides dense pixelwise supervision and encourages clear separation between foreground and background logits, which is especially important at the beginning of training when predictions are noisy. Soft Dice then shifts emphasis toward whole-mask agreement and reduces the dominance of the background class in the gradient signal. Symmetric Lovasz is introduced only after masks become reasonably stable, because its ranking-oriented behavior is more informative when the model already distinguishes foreground from background in a consistent way. Under this curriculum, the optimization proceeds from coarse discrimination to overlap improvement and finally to fine-grained correction of hard errors near the decision boundary [4; 5].

Implementation details. All experiments were conducted utilizing an NVIDIA Tesla P100 GPU. To accommodate the computational demands of high-resolution image processing, the training procedure was explicitly partitioned into two stages with distinct dataloader configurations. During the

initial 512×512 warm-start phase, the network was trained with a batch size of 14 and 4 data loader workers. For the subsequent 1024×1024 refinement phase, the batch size was reduced to 3 with 2 data loader workers to adhere to GPU memory limits. Optimization was governed by a cyclic learning-rate schedule of triangular type, where the learning rate oscillated between defined base and maximum values across specified epoch spans. The training curriculum comprised a total of 50 epochs (40 epochs at 512×512 resolution, followed by 10 epochs at 1024×1024 resolution) and incorporated staged unfreezing of the pre-trained backbone blocks alongside a progressive loss function transition. The precise hyperparameters for each mini-stage are detailed in Table 1.

Inference and operating-point control. At inference time, the network produces a continuous probability map, which must be converted into a binary mask. Instead of fixing the confidence threshold at 0.50, the present work evaluates a range of candidate thresholds on the validation set. In the final step, the thresholded mask may also be reset to empty if the total number of positive pixels is below a selected minimum value. This rule is intended to suppress small scattered false-positive regions that are unlikely to correspond to a plausible pneumothorax extent. Such a strategy is especially relevant under the SIIM-ACR scoring protocol, where an incorrect non-empty mask on a negative study is heavily penalized [1; 2].

The operating-point analysis is therefore more than a post-processing convenience. It is the stage at which the continuous statistical output of the network is translated into a discrete clinical decision. Confidence thresholding determines how much evidence is required before a pixel is declared positive, whereas the positive-pixel threshold determines how much spatial support is required before an image is treated as containing a meaningful

lesion. These two controls influence different error types. Confidence thresholding mainly changes the aggressiveness of the mask itself, while minimum-mask-size suppression removes isolated fragments that may survive thresholding but remain too small to be clinically plausible. Their joint analysis is thus necessary to understand how the model behaves under the SIIM scoring protocol.

Experimental results. The experimental evaluation is organized in three successive stages. First, encoder backbones are compared under a common decoder and training scheme. Second, the best backbone is evaluated across different confidence thresholds. Third, the same model is analyzed under joint confidence-threshold and minimum-mask-size control. This design makes it possible to separate the contribution of architecture selection from the contribution of operating-point selection.

In the following tabular results, the metric termed "Positive accuracy" represents image-level sensitivity for the positive class; it is calculated as the proportion of ground-truth positive studies in which the model correctly predicted a non-empty mask.

As shown in Table 2, SE-ResNeXt-50 provides the strongest overall backbone among the tested candidates. It achieves the highest mean Dice and the highest negative-case Dice, and therefore serves as the base model for the remaining experiments.

Although EfficientNet demonstrated a higher Positive-case Dice (0.4259 compared to 0.4072 for SE-ResNeXt-50), the selection of SE-ResNeXt-50 as the optimal backbone was driven purely by the mathematical formulation of the global evaluation metric. Under the SIIM-ACR scoring protocol, the final Mean Dice score heavily penalizes false-positive predictions on negative (empty) studies. SE-ResNeXt-50 achieved a noticeably higher

Table 1

Progressive training schedule, staged unfreezing, and cyclic learning rates

Resolution	Backbone Unfreezing Phase	Loss Function	Epochs	Base LR	Max LR
512x512	Decoder only (Backbone frozen)	Weighted BCE	12	1.00E-04	1.00E-03
	Unfreeze Backbone Block 4	Weighted BCE	2	5.00E-05	5.00E-04
	Unfreeze Backbone Block 3	Weighted BCE	2	5.00E-05	5.00E-04
	Unfreeze Backbone Block 2	Weighted BCE	2	5.00E-05	5.00E-04
	Unfreeze Backbone Block 1	Weighted BCE	2	5.00E-05	5.00E-04
	All layers unfrozen	Weighted Soft Dice	10	1.00E-05	1.00E-04
	All layers unfrozen	Symmetric Lovasz	10	1.00E-05	1.00E-04
1024x1024	All layers unfrozen	Weighted Soft Dice	4	1.00E-05	1.00E-04
	All layers unfrozen	Symmetric Lovasz	6	3.00E-06	6.00E-05

Negative-case Dice (0.9747 versus 0.9614 for EfficientNet), which mathematically outweighed its slightly lower positive-case performance. By minimizing weak positive activations outside plausible pleural regions, SE-ResNeXt-50 ultimately yielded the highest Global Mean Dice (0.8482). The selection is therefore justified by a strict alignment with the primary benchmark metric, explicitly trading a marginal loss in positive-case sensitivity for a critical reduction in false-positive penalties on healthy cases.

Table 3 shows the performance of the selected SE-ResNeXt-50 model across confidence thresholds. The results show that threshold tuning materially changes the trade-off between positive-case sensitivity and suppression of false-positive masks. Among threshold-only settings, the best operating point is achieved at a confidence threshold of 0.70.

The threshold-only analysis demonstrates that the default value of 0.50 should not be interpreted as an inherently meaningful operating point. It is merely a conventional midpoint on the sigmoid scale. The experiments show that the model reaches its best threshold-only result at 0.70, which implies that the raw probability map is better used in a more conservative manner. This observation is consistent with the class imbalance of the task and with the challenge metric itself. When false-positive fragments on negative studies are expensive, a threshold that is too permissive can lower final performance even if it preserves additional low-confidence positives.

The threshold-only analysis indicates that a more conservative decision rule improves overall performance mainly through stronger control of

false-positive non-empty predictions on negative studies. However, confidence thresholding alone does not fully eliminate weak scattered activations.

Table 4 summarizes the results of the joint confidence-threshold and minimum positive-pixel analysis. The combination of a 0.55 confidence threshold and a 2000-pixel minimum mask size yields the highest overall Mean Dice score (0.8549). While this configuration results in a slight decrease in Positive-case Dice compared to lower pixel thresholds (e.g., 0.4019 at 1000 pixels versus 0.3995 at 2000 pixels), the decision to adopt the 0.55 + 2000 operating point was driven entirely by the SIIM-ACR benchmark metric. The global Mean Dice heavily penalizes false-positive predictions on empty studies. Suppressing masks smaller than 2000 pixels aggressively eliminates spurious, low-volume false positives, thereby maximizing the Negative-case Dice (0.9855). Consequently, the chosen operating point represents a strict mathematical optimization for the challenge evaluation protocol. It deliberately sacrifices marginal sensitivity to exceedingly small true-positive regions in exchange for a substantial reduction in false-positive penalties across the dataset.

Taken together, the staged evaluation supports a concrete final method. The comparison of backbones identifies SE-ResNeXt-50 as the strongest encoder under the common optimization scheme. The threshold-only study identifies 0.70 as the best confidence threshold when no additional suppression is used. The final joint analysis shows that the strongest overall configuration is obtained at confidence threshold 0.55 with a minimum positive-pixel threshold of 2000. Thus, the final system

Table 2

Comparison of backbone encoders under the common training setup

Backbone	Mean Dice	Positive-case Dice	Negative-case Dice	Positive accuracy
ResNet34	0.8229	0.4027	0.9433	0.8403
EfficientNet	0.8421	0.4259	0.9614	0.7479
SE-ResNeXt-50	0.8482	0.4072	0.9747	0.7017

Table 3

SE-ResNeXt-50 performance across confidence thresholds

Confidence threshold	Mean Dice	Positive-case Dice	Negative-case Dice	Positive accuracy
0.1	0.697654	0.449978	0.768675	0.953782
0.2	0.806575	0.417738	0.918072	0.857143
0.3	0.836135	0.407528	0.959036	0.739496
0.4	0.843214	0.409886	0.96747	0.722689
0.5	0.848228	0.407172	0.974699	0.701681
0.6	0.851421	0.400495	0.980723	0.659664
0.7	0.851857	0.385646	0.985542	0.642857
0.8	0.847855	0.359283	0.987952	0.592437
0.9	0.835525	0.303954	0.987952	0.542017

Table 4

**SE-ResNeXt-50 performance under joint confidence-threshold
and positive-pixel-threshold selection**

Confidence threshold	Pixel threshold	Mean Dice	Positive-case Dice	Negative-case Dice	Positive accuracy
0.6	250	0.8542	0.4003	0.9843	0.6512
0.6	500	0.8541	0.4003	0.9843	0.6512
0.55	1000	0.8545	0.4019	0.9843	0.6428
0.55	1500	0.8540	0.3995	0.9843	0.6386
0.55	2000	0.8549	0.3995	0.9855	0.6386
0.55	2500	0.8537	0.3942	0.9855	0.6260

is defined jointly by its backbone, training schedule, and inference decision rule.

Model robustness and variance. To verify the stability of the proposed approach and ensure the results are not heavily biased by a single data partition, an additional 10-fold cross-validation experiment was conducted. The selected SE-ResNeXt-50 architecture was evaluated across all ten folds utilizing the confidence-threshold-only operating condition. Across the 10 independent test sets, the model achieved a mean Dice score of 0.8495 with a standard deviation of only 0.0038 (alongside a validation mean of 0.8452 ± 0.0044). This exceptionally low variance demonstrates that the model's representational capabilities are highly robust and generalize consistently across different subsets of the data. Although the final combined post-processing rule (confidence threshold plus minimum positive pixel mask) was specifically tuned and evaluated on the primary stratified split to establish the absolute optimal operating point for the SIIM-ACR protocol, the underlying stability of the backbone and training methodology is clearly confirmed by the cross-validation results.

Context within state-of-the-art methods. While top-performing solutions in the SIIM-ACR challenge often rely on heavy ensembling of multiple architectures to maximize absolute metric scores, the primary objective of this study is methodological transparency. Complex ensembles obscure the specific impact of individual design choices. By analyzing a single, strong baseline model (SE-ResNeXt-50), this research explicitly isolates how the staged training curriculum and post-processing decision rules (confidence thresholding and minimum mask size) independently contribute to final performance. Therefore, rather than proposing a highly parameterized ensemble to compete for marginal state-of-the-art leaderboard gains, this study offers a clear, reproducible framework demonstrating how systematic operating-point selection bridges the gap between raw

probability maps and clinically applicable, metric-optimized predictions.

Conclusions. The conducted study substantiates a practical method for pneumothorax segmentation on chest radiographs based on a U-Net-style decoder, pretrained convolutional encoders, progressive 512×512 to 1024×1024 fine-tuning, cyclic learning-rate scheduling, and a staged BCE-Dice-Lovasz loss curriculum. The three-stage evaluation demonstrates that the final quality of the method is determined by a consistent chain of design choices. SE-ResNeXt-50 proved to be the strongest backbone among the evaluated candidates. Within threshold-only analysis, the best operating point was achieved at confidence threshold 0.70. The strongest final result was obtained when a moderate confidence threshold of 0.55 was combined with suppression of masks containing fewer than 2000 positive pixels.

An additional practical advantage of this methodology is its transparency. Each major performance gain can be attributed to a clearly identifiable design choice: the backbone comparison establishes the representation capacity of the encoder, the 512×512 warm start improves optimization stability, the 1024×1024 refinement restores boundary detail, and the final operating-point selection aligns inference with the evaluation metric. Such transparency is useful both scientifically and operationally. Scientifically, it allows the contribution of architecture, training schedule, and decision rule to be separated. Operationally, it suggests that meaningful gains can still be obtained through disciplined experimental design, even when no architectural novelty is introduced.

These findings show that the final operating point must be treated as an integral element of a pneumothorax segmentation method rather than a secondary afterthought. Under the SIIM-ACR metric, the conversion of a continuous probability map into a clinically meaningful binary mask strongly influences overall performance, particularly through the control of false-positive masks

on negative studies. Consequently, architecture, training schedule, loss design, and inference decision rule should be reported together as components of one system.

Limitations and prospects for further research. A primary limitation of the current study is that the proposed model has been trained and evaluated exclusively on the SIIM-ACR dataset. Consequently, its direct applicability to diverse, real-world clinical environments remains an open question. Radiographic characteristics vary significantly across medical institutions due to differences in X-ray acquisition protocols and input data characteristics. For instance, the visual presentation of a pneumothorax differs substantially between erect (standing) and supine (lying down) patient positioning, the latter being very common in emergency and intensive care units. Furthermore, variations in hardware (portable versus fixed-room scanners), exposure parameters, and

the presence of overlapping clinical features (such as pleural effusions, pneumonia, chest tubes, or external medical lines) can alter the delicate contrast of the pleural line.

Because the proposed method relies heavily on a tuned operating point (0.55 confidence and 2000-pixel minimum area) specifically optimized for the SIIM-ACR dataset's unique imaging distribution, these static thresholds may not generalize out-of-the-box to datasets with different image characteristics. Therefore, future research must prioritize external validation on independent, multi-institutional datasets to evaluate the cross-domain transferability of the model and its post-processing rules. Additionally, further investigation should explore dynamic, calibration-aware operating-point selection, and compare simple positive-pixel suppression against more complex largest-connected-component analysis to better adapt to varying clinical inputs.

BIBLIOGRAPHY:

1. SIIM-ACR Pneumothorax Segmentation Challenge [Electronic resource]. Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/c/siim-acr-pneumothorax-segmentation> (accessed: 25.03.2026).
2. Pneumothorax Kaggle Challenge overview and winning teams [Electronic resource]. SIIM. URL: <https://siim.org/research-journal/siim-machine-learning-challenges/pneumothorax-kaggle-challenge/> (accessed: 25.03.2026).
3. Sneddy. SIIM-ACR Pneumothorax first-place solution [Electronic resource]. GitHub. URL: <https://github.com/sneddy/pneumothorax-segmentation> (accessed: 25.03.2026).
4. Abedalla A., Abdullah M., Al-Ayyoub M., Benkhelifa E. Chest X-ray pneumothorax segmentation using U-Net with EfficientNet and ResNet architectures. *PeerJ Computer Science*. 2021. Vol. 7. Art. e607. DOI: 10.7717/peerj-cs.607.
5. Wang Y., Wang K., Peng X. et al. DeepSDM: Boundary-aware pneumothorax segmentation in chest X-ray images. *Neurocomputing*. 2021. Vol. 454. P. 201–211. DOI: 10.1016/j.neucom.2021.05.029.
6. Dumbrique J. I. S., Hernandez R. B., Cruz J. M. L. et al. Pneumothorax detection and segmentation from chest X-ray radiographs using a patch-based fully convolutional encoder-decoder network. *Frontiers in Radiology*. 2024. Vol. 4. Art. 1424065. DOI: 10.3389/fradi.2024.1424065.
7. Sae-Lim W., Wettayaprasit W., Suwannanon R., Cheewatanakornkul S., Aiyarak P. Automated pneumothorax segmentation and quantification algorithm based on deep learning. *Intelligent Systems with Applications*. 2024. Vol. 22. Art. 200383. DOI: 10.1016/j.iswa.2024.200383.

REFERENCES:

1. SIIM-ACR Pneumothorax Segmentation Challenge. (n.d.). Kaggle. Retrieved from <https://www.kaggle.com/c/siim-acr-pneumothorax-segmentation>
2. SIIM. (n.d.). Pneumothorax Kaggle Challenge overview and winning teams. Retrieved from <https://siim.org/research-journal/siim-machine-learning-challenges/pneumothorax-kaggle-challenge/>
3. Sneddy. (n.d.). SIIM-ACR pneumothorax first-place solution. GitHub. Retrieved from <https://github.com/sneddy/pneumothorax-segmentation>
4. Abedalla, A., Abdullah, M., Al-Ayyoub, M., & Benkhelifa, E. (2021). Chest X-ray pneumothorax segmentation using U-Net with EfficientNet and ResNet architectures. *PeerJ Computer Science*, 7, e607. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.607>
5. Wang, Y., Wang, K., Peng, X., Shi, L., Sun, J., Zheng, S., Shan, F., Shi, W., & Liu, L. (2021). DeepSDM: Boundary-aware pneumothorax segmentation in chest X-ray images. *Neurocomputing*, 454, 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.05.029>
6. Dumbrique, J. I. S., Hernandez, R. B., Cruz, J. M. L., et al. (2024). Pneumothorax detection and segmentation from chest X-ray radiographs using a patch-based fully convolutional encoder-decoder network. *Frontiers in Radiology*, 4, Article 1424065. <https://doi.org/10.3389/fradi.2024.1424065>
7. Sae-Lim, W., Wettayaprasit, W., Suwannanon, R., Cheewatanakornkul, S., & Aiyarak, P. (2024). Automated pneumothorax segmentation and quantification algorithm based on deep learning. *Intelligent Systems with Applications*, 22, Article 200383. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200383>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.15-196 : 669.017

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-7>

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГОВАНИХ ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ ДЛЯ МАСИВНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ВИЛИВКІВ

Воронов Олександр Сергійович,

аспірант

Державного біотехнологічного університету

ORCID ID: 0009-0009-2284-4152

Ключко Оксана Юріївна,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні

Державного біотехнологічного університету

ORCID ID: 0000-0003-3623-6587

У статті досліджено проблеми формування структури та механічних властивостей масивних композиційних виливків, робочий шар яких виготовляється з високохромистих чавунів. В умовах повільного охолодження та відсутності проміжного буферного шару критично важливим є забезпечення стабільності властивостей та міцності перехідної зони між зносостійким шаром та матеріалом серцевини. Для вирішення цього завдання проведено комплексний аналіз вибірки з 30 плавок із різним співвідношенням Cr/C та системою мікролегування. Застосовано методи регресійного аналізу для побудови математичних моделей впливу хімічного складу на твердість та характеристики міцності. Встановлено, що оптимальний баланс властивостей досягається при співвідношенні карбідоутворюючих елементів $5 < \text{Cr/C} < 7.5$ та вмісті хрому 15.0–18.0%. Це запобігає виділенню крихких первинних карбідів кубічного типу та суттєво знижує залишкові термічні напруження. Показано, що комплексний вплив легування нікелем і молібденом гальмує перлітне перетворення переохолодженого аустеніту в умовах сповільненого тепловідводу, а мікролегування титаном та бором сприяє подрібненню зерна та рівномірному розподілу карбідної фази. Визначено, що для забезпечення задовільної оброблюваності різанням та достатньої в'язкості перехідної зони співвідношення карбідо- до аустенітоутворюючих елементів має становити 1.5–2.0. Доведено наявність стійкої кореляції між твердістю та міцністю високохромистого чавуну, що дозволяє використовувати розраховані коефіцієнти переходу для неруйнівного контролю готових виробів. На основі отриманих даних запропоновано оптимізований хімічний склад комплексно-легованого чавуну, що гарантує високу експлуатаційну надійність масивних композиційних деталей.

Ключові слова: високохромистий чавун, механічні властивості, мікроструктура, масивні композиційні виливки, співвідношення Cr/C, комплексне легування, математичне моделювання.

Voronov Olexandr, Klochko Oksana. Structure and properties of complex-alloyed high-chromium cast irons for massive composite castings

The article investigates the problems of structure formation and mechanical properties of massive composite castings, the working layer of which is made of high-chromium cast irons. Under slow cooling conditions and in the absence of an intermediate buffer layer, it is critical to ensure the stability of properties and the strength of the transition zone between the wear-resistant layer and the core material. To address this issue, a comprehensive analysis of 30 heats with different Cr/C ratios and microalloying systems was conducted. Regression analysis methods were applied to build mathematical models of the chemical composition's influence on hardness and strength characteristics.

It has been established that the optimal balance of properties is achieved with a carbide-forming elements ratio of $5 < \text{Cr/C} < 7.5$ and a chromium content of 15.0–18.0%. This prevents the precipitation of brittle primary cubic carbides and significantly reduces residual thermal stresses. It is shown that the combined effect of alloying with nickel and molybdenum inhibits the pearlitic transformation of supercooled austenite under conditions of delayed heat dissipation, while microalloying with titanium and boron promotes grain refinement and uniform distribution of the carbide phase.

It was determined that to ensure satisfactory machinability and sufficient toughness of the transition zone, the ratio of carbide- to austenite-forming elements must be 1.5–2.0. The presence of a stable correlation between the hardness and strength of high-chromium cast iron is proven, which allows using the calculated transition coefficients to evaluate the properties of finished products. Based on the obtained data, an optimized chemical composition of complex-alloyed cast iron is proposed, which guarantees high operational reliability of massive composite components.

Key words: high-chromium cast iron, mechanical properties, microstructure, massive composite castings, Cr/C ratio, complex alloying, mathematical modeling.

Вступ. Високохромисті чавуни (ВХЧ) широко відомі своєю винятковою стійкістю до зносу та окислення. Завдяки гетерогенній структурі, що складається з твердих карбідів та металевої матриці, ці сплави незамінні в складних умовах експлуатації (термоциклічні навантаження, великі питомі тиски, агресивне середовище), зокрема в металургії, видобутку та переробці корисних копалин.

Сучасний розвиток технологій металургійного машинобудування демонструє еволюцію від монолітних деталей до складних композиційних систем. Такі вироби за своєю суттю є металевими макрокомпозицями, у яких кожен шар виконує свою функціональну роль: робочий шар забезпечує зносостійкість, а серцевина – конструкційну міцність. Сьогодні, окрім класичних двошарових виливків, у світовій практиці знаходять застосування тришарові конструкції [1]. У таких композицях між робочим шаром із ВХЧ та в'язкою серцевиною вводиться додатковий буферний шар, який виконує роль демпфера термічних напружень та бар'єра для дифузії вуглецю. Це дозволяє більш плавно розподілити градієнт напружень і уникнути утворення крихких зон на межі шарів у надмасивних виробках.

Порівняльний аналіз розподілу механічних характеристик та залишкових напружень для дво- та тришарових систем [2] представлено на рис. 1. Як видно з наведених кривих, у двошаровому виконанні спостерігається різкий стрибок твердості та значний пік внутрішніх напружень на межі сплавлення двох металів. Введення буферного шару дозволяє "розмити"

ці максимуми, що суттєво знижує ризик відшарування робочого шару під час експлуатації.

Проте виготовлення тришарових систем є технологічно надскладним та економічно витратним процесом. Для більшості промислових застосувань (масивні прокатні валки, броні млинів) найбільш раціональним залишається використання масивних двошарових виливків. Основна складність їх виготовлення та експлуатації полягає у забезпеченні стабільності структури та міцності зчеплення шарів (за відсутності буферного шару) в умовах уповільненого охолодження великих мас металу.

Властивості високохромистих чавунів визначаються типом сформованих фаз і їх співвідношенням. В результаті аналізу ряду експериментальних даних [3-5] встановлено зв'язок зносостійкості, міцності з хімічним складом сплаву, що впливає на морфологію, кількість і розміри карбідної фази. Дослідження показали, що в аустенітному зерні виникають мікро-неоднорідності в розподілі елементів. При розпаді переохолодженого аустеніту в областях, збагачених хромом і вуглецем (у центрі зерна), виявлено формування високодисперсних вторинних карбідів.

Як впливає з діаграми стану Fe-Cr-C, рис. 2 [6; 7], при співвідношенні $Cr/C < 3.5$ кристалізація сплаву відбувається з утворенням евтектики ледебуриту з карбідами цементитного типу Me_3C .

Оптимальна структура формується при відношенні $Cr/C = 3.5-10.2$: затвердіння чавунів починається з утворення аустеніту, а евтектика формується з аустеніту і тригональних карбідів

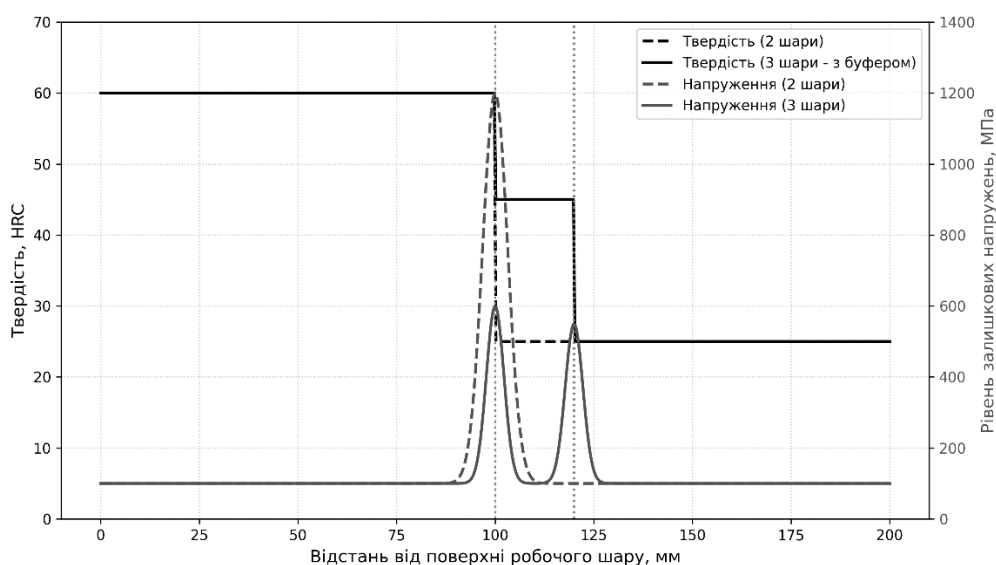


Рис. 1. Порівняльна схема розподілу твердості та залишкових напружень по глибині двошарового (пунктирна лінія) та тришарового (суцільна лінія) виливків

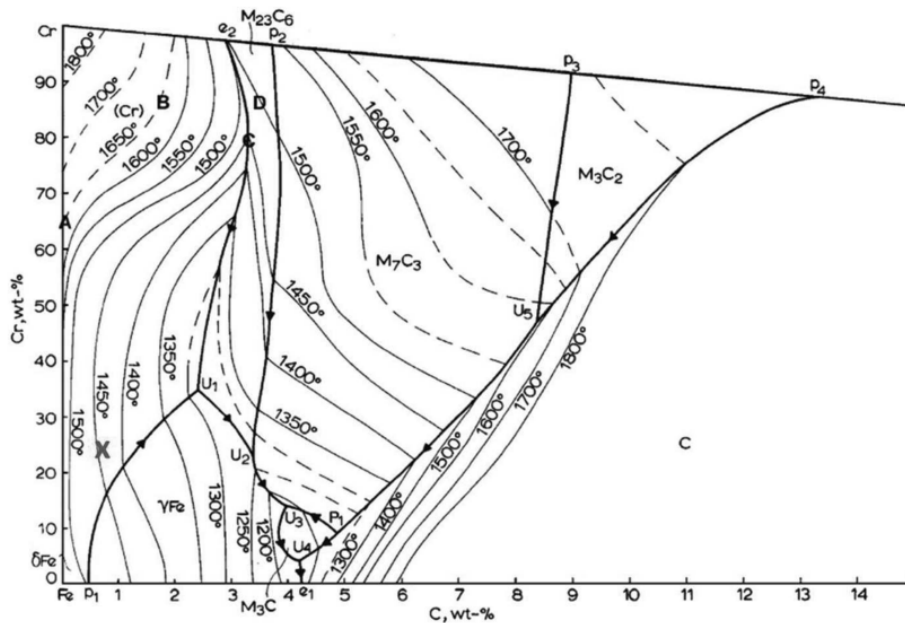


Рис. 2. Положення поверхонь ліквідусу поблизу кута з високою концентрацією заліза [7]

типу Me_7C_3 (містять 50 - 70%Cr). Це забезпечує більш сприятливе їх розташування і визначає зносостійкість та міцність чавуну. Подальше збільшення співвідношення $Cr/C > 10.2$ є недоцільним, оскільки зменшується частка спеціальних карбідів тригонального типу Me_7C_3 , натомість утворюється α -фаза та спеціальні карбіди кубічного типу $Me_{23}C_6$, що негативно позначається на зносостійкості сплаву. Отже, збільшення співвідношення Cr/C вище зазначених меж недоцільно внаслідок виділення великих і крихких первинних карбідів.

Актуальність та мета дослідження.

У виробництві масивних двохшарових виливків необхідно забезпечити такий рівень комплексного легування робочого шару, який дозволив би досягти заданої твердості, мінімізувати градієнт внутрішніх напружень на межі сплавлення та забезпечити необхідну міцність. Для обґрунтування вибору компонентів доцільно розглянути вплив як основних, так і легуючих складових на формування структури. У зв'язку з цим, метою даної роботи є оцінка впливу хімічного складу (зокрема співвідношення Cr/C) на механічні властивості високохромистих чавунів, що дозволить оптимізувати склад робочого шару масивних виливків та створити базу для використання неруйнівних методів контролю їх міцності.

Матеріали та методи досліджень. Досліджувані матеріали та легування. Для оцінки впливу хімічного складу на формування структури та механічних властивостей робочого шару масивних двохшарових виливків було

досліджено промислові та дослідно-промислові плавки високохромистих чавунів. Загальна вибірка становила 30 варіантів сплавів, що суттєво відрізнялися базовим співвідношенням карбидоутворюючих елементів (зокрема Cr/C) та комплексом мікролегування.

Хімічний склад досліджуваних чавунів варіювався в наступних межах (% мас.): 2.65-2.82 C; 0.62-0.93 Si; 0.63-1.45 Mn; ≤ 0.041 P; $0.052 \leq S$; 2.92-26.8 Cr; 0.11-1.0 Ni; 2.03-5.61 Cu; ≤ 0.079 V; ≤ 0.37 Mo; ≤ 0.44 V; 0.15-0.4 Ti. Вміст основних домішок (Si, Mn, S, P) підтримувався у вузькому технологічному інтервалі для мінімізації їхнього побічного впливу на результати експерименту.

Особливу увагу було приділено комплексному мікролегуванню, яке є критичним для масивних перерізів.

Титан (Ti) вводили в кількості 0.15–0.40 % як ефективний модифікатор другого роду для отримання дрібнозернистої структури та підвищення зносостійкості. Введення Ti в кількості менше 0,1-0,15% є неефективним, тоді як його надлишок (більше 2.0 %) є недоцільним через різке зменшення рідкоплинності чавуну, збільшення газонасиченості та підвищення пористості, що є критичним дефектом на межі сплавлення багатошарового виливка [8].

Бор (B) у зазначених межах використовували як активний аустенізатор, що сприяє рівномірному розподілу дрібнодисперсних карбідів по всьому масивному перерізу виливка, запобігаючи їх коагуляції при уповільненому охолодженні.

Підготовка зразків. Для коректної імітації швидкості охолодження масивного двошарового виливка (де тепловідвід суттєво уповільнений) випробування проводили на спеціально виготовлених литих зразках. Заливка здійснювалася у форми з контрольованим тепловідводом, що дозволило наблизити умови кристалізації та формування первинних карбідів до реальних промислових умов виготовлення товстостінних деталей (броней млинів, прокатних валків).

Механічні випробування та неруйнівний контроль. Оскільки для крихких матеріалів, до яких належить високохромистий чавун, виготовлення стандартних зразків для випробувань на розтяг є ускладненим, оцінку характеристик міцності проводили комплексно. Вимірювання твердості здійснювали за методами Брінелля (НВ) та Шора (HSD). Випробування на міцність при вигині (σ_{zg}) та стисканні (σ_{ct}) виконували на універсальних випробувальних машинах.

Базуючись на фундаментальних дослідженнях (залежність Гуляєва-Гудцова) [9], яка підтверджує наявність стійкого співвідношення між рівнем твердості та міцністю крихких матеріалів [10], у роботі було використано розрахункову модель:

$$HB = k \cdot \sigma \quad (1),$$

де НВ – твердість за Брінеллем, k – коефіцієнт переходу, σ – границя міцності.

Визначення розрахункових коефіцієнтів переходу σ_{zg}/HB та σ_{ct}/σ_{ct} для сплавів з різним співвідношенням Cr/C стало основою для створення бази даних неруйнівного методу контролю. Це дозволяє оперативно оцінювати міцність робочого шару безпосередньо на готових масивних виливках.

Статистична обробка даних (Математичне моделювання). Властивості ВХЧ залежать від великої кількості факторів, що ускладнює опис їхнього впливу точними термодинамічними функціями. Тому для аналізу результатів застосовано комп'ютерні методи багатовимірної математичної статистики та регресійного аналізу. Формальний математичний опис системи (кореляційний зв'язок) дозволив визначити рівень значущості кожного легуючого елемента та оптимізувати базовий хімічний склад для досягнення максимальних експлуатаційних властивостей.

Результати досліджень та їх обговорення. Виходячи з умов експлуатації масивних двошарових виливків, головними вимогами до матеріалу робочого шару є високі показники твердості при збереженні достатнього рівня міцності для протидії магістральним тріщинам. Значення

твердості, розрахункові коефіцієнти переходу і характеристики міцності для досліджуваних сплавів з різним співвідношенням Cr/C наведені в табл. 1.

Аналіз масиву експериментальних даних свідчить, що зі збільшенням відношення Cr/C твердість і границя міцності при стисненні послідовно підвищуються, тоді як значення границі міцності при вигині починають зменшуватися. Наочна візуалізація цих залежностей представлена на рис. 3.

Як видно з наведених графіків, розкид значень σ_{zg} суттєво зростає при Cr/C > 7.5. Це пояснюється зміною морфології первинних фаз, появою залишкового аустеніту і збільшенням загальної частки карбідної фази. Для масивних виливків падіння міцності на вигин (або її нестабільність) є вкрай небажаним, оскільки саме цей параметр відповідає за опір відшаруванню робочого шару від в'язкої серцевини.

Користуючись отриманими залежностями, досліджувані зразки були класифіковані на групи (табл. 2).

Встановлено, що для умов уповільненого охолодження масивних деталей найбільшу стабільність комплексу механічних властивостей мають чавуни, що входять в область $5 < Cr/C < 7.5$ і містять хром в інтервалі 15-18.0%.

Рівень міцності і твердості високохромистого сплаву багато в чому визначається типом, розміром, розподілом карбідної фази, в меншій мірі структурою металевої матриці [3; 5; 11]. Співвідношення фаз матриці можна регулювати відповідним легуванням і наступною термообробкою. Властивості карбідної фази зумовлені умовами кристалізації. У зв'язку з цим, для вивчення міцності, була проведена оцінка впливу легуючих домішок на механічні властивості матеріалу робочого шару виливків.

Оскільки властивості багатокomпонентних систем складно описати точними кінетичними функціями, шляхом статистичної обробки вибірки була отримана математична модель. Вона визначає рівень значущості кожного фактора (елемента) щодо формування характеристик міцності та твердості (табл. 3).

Аналіз коефіцієнтів моделі показує високий вплив хрому та вуглецю на базові характеристики, що підтверджує попередні висновки. Однак для масивних перерізів критично важливими виявилися показники впливу нікелю (Ni) та молібдену (Mo) на границю міцності (σ_{zg}). Комплексний вплив зазначених легуючих елементів забезпечує ефективне гальмування перлітного розпаду аустеніту за умов низьких швидкостей охолодження виливка у ливарній формі.

Таблиця 1

Механічні властивості високохромистих чавунів залежно від хімічного складу

№ п/п	Cr/C	Механічні властивості					
		Твердість		Границя міцності		σ_{3T}/HB	σ_{3T}/σ_{CT}
		HSD	HB	при вигині, σ_{3T} МПа	при стисканні, σ_{CT} МПа		
1	2.09	62	441	880	1790	2.00	0.49
2	1.08	60	437	820	1590	1.88	0.52
3	1.12	59	430	903	1600	2.10	0.56
4	1.10	58	423	856	1601	2.02	0.53
5	2.01	64	460	820	1800	1.78	0.46
6	1.05	58	423	780	1650	1.84	0.47
7	2.06	60	437	900	1890	2.06	0.48
8	4.50	65	469	930	2005	1.98	0.46
9	4.61	66	477	960	2010	2.01	0.48
10	4.61	64	460	950	2061	2.07	0.46
11	4.57	67	486	962	2150	1.98	0.45
12	7.67	71	523	920	2300	1.76	0.40
13	7.58	70	512	1021	2400	1.99	0.43
14	7.70	72	532	930	2430	1.75	0.38
15	7.78	74	545	1025	2500	1.88	0.41
16	4.51	73	538	885	2090	1.64	0.42
17	4.54	74	545	830	2001	1.52	0.41
18	4.75	71	523	900	1985	1.72	0.45
19	6.42	50	364	638	1790.5	1.75	0.36
20	8.27	55	402	533	2293.5	1.33	0.23
21	4.39	75	555	480	1900	0.86	0.25
22	3.77	66	477	412	1890	0.86	0.22
23	4.50	45	321	684	1896	2.13	0.36
24	6.54	46	332	644	1889	1.94	0.34
25	6.57	46	332	771.7	1994	2.32	0.39
26	9.43	73	538	766	2350	1.42	0.33
27	10.04	70	512	693	2400	1.35	0.29
28	6.09	70	512	522.25	1870	1.02	0.28
29	6.09	65	469	567.4	1877	1.21	0.30
30	6.20	65	469	559.2	1863	1.19	0.30

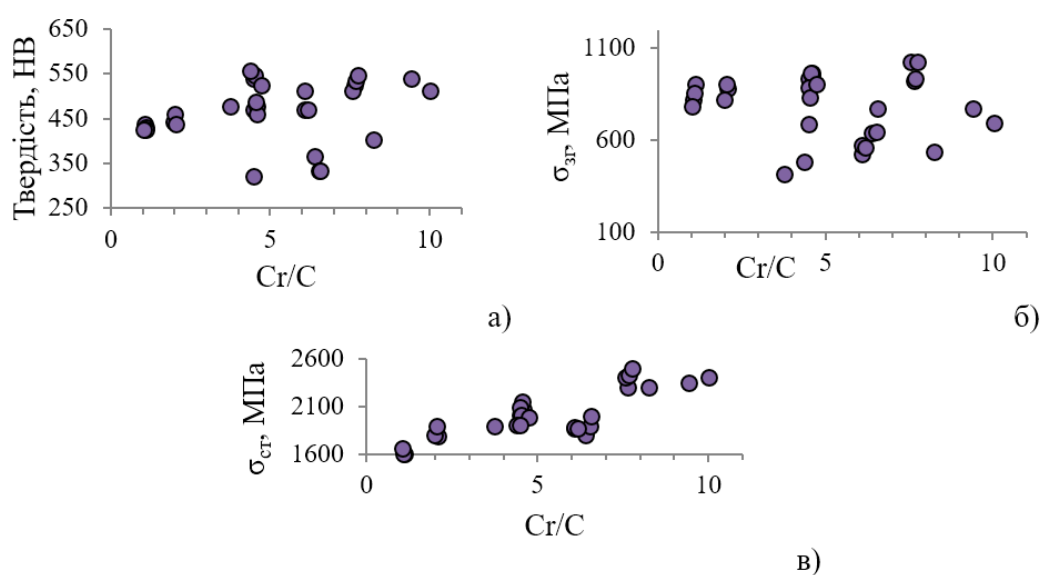


Рис. 3. Залежність механічних характеристик від співвідношення Cr/C: а) твердість; границя міцності при: б) вигині; в) стисканні

Таблиця 2

Залежність механічних властивостей від співвідношення Cr/C

Параметр	1<Cr/C<3,5	3,5<Cr/C<5	5<Cr/C<7,5	7,5<Cr/C<10
Cr, %	2,9-5,9	10,8-13,0	15,0-18,0	20,0-27,0
$\sigma_{зг}$, МПа	780-903	412-962	520-560	693-1021
$\sigma_{ст}$, МПа	1590-1900	1890-2150	1840-1900	2090-2400
HSD	58-64	64-75	65-70	70-74

Таблиця 3

Рівень значущості коефіцієнтів отриманої математичної моделі

Фактори	HSD	$\sigma_{зг}$	$\sigma_{ст}$
C	103,424	436,645	3,111
Si	1,718	38,125	2,387
Mn	16,669	1,181	2,285
P	1,194	1,405	1,015
S	8,655	3,080	1,035
Cr	31,834	3,130	132,987
Ni	10,234	29,402	37,455
Cu	1,473	1,200	10,150
B	1,095	2,210	3,789
Mo	4,655	3,072	7,941
V	1,001	1,023	1,588
Ti	19,668	4,387	3,148

Важливим етапом виготовлення двошарового виливка є його механічна обробка. Отримані моделі дозволили встановити, що добра оброблюваність високохромистих чавунів у литому стані забезпечується за умови жорсткого контролю співвідношення карбідо- до аустенітоутворюючих елементів.

Виявлено, що це співвідношення повинно знаходитися в інтервалі 1.5–2.0. Вихід за ці межі призводить до різкого погіршення оброблюваності: при перевищенні показника (більше 2.0) різко зростає кількість високоміцної карбідної фази, що робить матеріал нездоланим для різального інструменту. При зниженні (менше 1.5) зростає частка залишкового аустеніту, що призводить до підвищеної в'язкості, наклепу при різанні та ризику фазових перетворень (утворення мартенситу деформації) під час механічної обробки.

На підставі результатів кореляційного аналізу та експериментальних даних розроблено комплексно-легований високохромистий чавун. Даний сплав оптимізовано спеціально для використання в якості робочого шару масивних двошарових виливків, де відсутній буферний шар, що вимагає балансу між зносостійкістю поверхні та структурною стабільністю на межі зі матеріалом серцевини.

Оптимальний хімічний склад (% мас.):
 2.62-2.97C, 0.91-1.07Si, 0.80-0.86Mn,
 15.9-17.1Cr, 1.32-1.51Ni, 1.15-1.24Mo,
 0.21-0.38Cu, 0.20-0.37V, 0.05-0.07%B,

0.17-0.25%Ti. Проведений додатковий статистичний аналіз повністю підтверджує надійність отриманих експериментальних даних для запропонованого діапазону легування.

Висновки

1. Встановлено, що для забезпечення стабільності механічних властивостей робочого шару масивних композиційних виливків оптимальним є співвідношення $5 < Cr/C < 7.5$ при вмісті хрому 15.0–18.0 %. Це запобігає виділенню крихких карбідів $Me_{23}C_6$ та дозволяє знизити рівень залишкових термічних напружень на межі сплавлення з матеріалом серцевини.

2. Доведено, що комплексний вплив легуючих елементів (зокрема Ni та Mo) забезпечує ефективно гальмування перлітного розпаду аустеніту за умов низьких швидкостей охолодження.

3. За результатами моделювання встановлено, що оптимальна в'язкість перехідної зони та оброблюваність різанням гарантуються при співвідношенні карбідо- до аустенітоутворюючих елементів у межах 1.5–2.0.

4. Визначені коефіцієнти переходу ($\sigma_{зг}/HB$ та $\sigma_{зг}/\sigma_{ст}$) створюють базу для неруйнівного контролю міцності безпосередньо на готових масивних композитах.

5. Запропоновано оптимізований хімічний склад чавуну для робочого шару масивних виливків, %: 2.62–2.97 C; 15.9–17.1 Cr; 1.20–1.51 Ni; 0.90–1.25 Mo; 0.17–0.25 Ti та ін.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Li Y., Zhang S., Wang Q. et al. Microstructure and mechanical properties of bimetallic white cast iron/steel composites produced by liquid–liquid casting. *Materials & Design*. 2014. Vol. 56. P. 70–76.
2. Adams C.L. Residual stress investigations in layered metallic systems. 2025.
3. Скобло Т.С. та ін. Виробництво та застосування прокатних валків. *Довідник*: під ред. проф. Скобло Т.С. Х.: ЦД № 1. 2013. 572 с.
4. Скобло Т.С., Ключко О.Ю., Сидашенко О.І., Белкін Є.Л. Теоретичні та експериментальні основи прогнозування структуроутворення, властивостей високовуглецевих легованих сплавів. Монографія: під ред. проф. Т.С. Скобло. Х.: Діса плюс. 2019. 278 с.
5. Wiecezrak K., Bała P., Stępień M., Cios G., Kozieł T. The Characterization of Cast Fe–Cr–C Alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. Vol. 60, No. 2. P. 805–808.
6. Jackson R.S. The austenite liquidus surface and constitutional diagram for the Fe–Cr–C metastable system. *Iron and Steel Instit.* 1970. Vol. 208(2). P. 163–167.
7. Wiecezrak K., Bała P., Stępień M., Cios G., Kozieł T. The Characterization of Cast Fe–Cr–C Alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. № 60 (2). DOI: 10.1515/amm-2015-0206
8. Spuzic S., Strafford K.N., Subramanian C. et al. Wear of hot rolling mill rolls: an overview. *Wear*. 1994. Vol. 176. P. 261–271.
9. Cahoon J.R., Broughton W.H., Kutzak A.R. Determination of yield strength from hardness measurement results. *Metallurgical Transactions*. 1971. T. 2. P. 1979–1983.
10. Ключко О.Ю. Вплив низькотемпературної циклічної термообробки на структурну неоднорідність у масивних виливках із високохромистого комплекснолегованого чавуну. *Вісник ХНТУСГ*. 2010. Вип.101. С. 73–77.
11. Tabrett C.P., Sare I.R., Ghomashchi M.R. Microstructure–property relationships in high chromium white iron alloys. *International Materials Reviews*. 1996. Vol. 41, No. 2. P. 59–82.

REFERENCES:

1. Li, Y., Zhang, S., Wang, Q., et al. (2014). Microstructure and mechanical properties of bimetallic white cast iron/steel composites produced by liquid–liquid casting. *Materials & Design*, 56, 70–76.
2. Adams, C. L. (2025). Residual stress investigations in layered metallic systems.
3. Skoblo, T. S., et al. (2013). Vyrobnystvo ta zastosuvannya prokatnykh valkiv [Production and application of rolling rolls]. Kharkiv: TsD No. 1 [in Ukrainian].
4. Skoblo, T. S., Klochko, O. Yu., Sidashenko, O. I., Bielkin, Ye. L. (2019). Teoretychni ta eksperymentalni osnovy prohnozuvannya strukturoutvorennia, vlastyvostei vysokovuhletsevykh lehovanykh splaviv [Theoretical and experimental foundations of predicting structure formation and properties of high-carbon alloyed alloys]. Kharkiv: Disa Plus [in Ukrainian].
5. Wiecezrak, K., Bała, P., Stępień, M., Cios, G., Kozieł, T. (2015). The characterization of cast Fe–Cr–C alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(2), 805–808.
6. Jackson, R. S. (1970). The austenite liquidus surface and constitutional diagram for the Fe–Cr–C metastable system. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 208(2), 163–167.
7. Wiecezrak, K., Bała, P., Stępień, M., Cios, G., Kozieł, T. (2015). The characterization of cast Fe–Cr–C alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(2). <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0206>
8. Spuzic, S., Strafford, K. N., Subramanian, C., et al. (1994). Wear of hot rolling mill rolls: an overview. *Wear*, 176, 261–271.
9. Cahoon, J. R., Broughton, W. H., Kutzak, A. R. (1971). Vyznachennia hranytsi tekuchosti za rezultatamy vymiriuvannya tverdosti [Determination of yield strength from hardness measurements]. *Metallurgical Transactions*, 2, 1979–1983 [in Ukrainian].
10. Klochko, O. Yu. (2010). Vplyv nyzkotemperaturnoi tsyklichnoi termoobrobky na strukturnu neodnorodnist u masyvnykh vylyvkakh iz vysokokhromystoho kompleksnolehovanoho chavunu [Effect of low-temperature cyclic heat treatment on structural heterogeneity in massive castings of high-chromium alloyed cast iron]. *Visnyk KhNTUSG – Bulletin of KhNTUSG*, 101, 73–77. [in Ukrainian].
11. Tabrett, C. P., Sare, I. R., Ghomashchi, M. R. (1996). Microstructure–property relationships in high chromium white iron alloys. *International Materials Reviews*, 41(2), 59–82.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 15.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 621.771.8:669.018.9

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-8>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ДВОШАРОВИХ БІМЕТАЛІЧНИХ ЛИСТІВ З МЕХАНІЧНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

Міхєєнко Денис Юрійович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-1966-0618

У роботі представлено результати експериментально-теоретичного дослідження процесу формування механічного з'єднання при виготовленні двошарових біметалічних листів методом прокатки. Актуальність дослідження обумовлена зростаючою потребою у сучасних конструкційних матеріалах із заданим комплексом експлуатаційних і технологічних властивостей, що досягається шляхом створення шаруватих композитів. Запропоновано технологічну схему отримання біметалів на основі спільного обтиснення заготовок із попереднім формуванням поздовжніх пазів на більш міцній підкладці, що забезпечує надійний механічний зв'язок за рахунок затікання більш пластичного металу без застосування високотемпературних процесів.

Експериментальні дослідження виконано з використанням промислово-лабораторного прокатного стану та комплексу вимірювального обладнання, що дозволило варіювати основні технологічні параметри процесу, зокрема ступінь обтиснення, геометрію пазів, умови контактної тертя та фізико-механічні властивості матеріалів. Дослідження проводилися у двох напрямках: фізичне моделювання процесу пластичного течіння металу в пази та моделювання реального формування біметалічного з'єднання типу «сталь – м'який метал». Отримано експериментальні залежності енергосилових параметрів прокатки та глибини заповнення пазів від технологічних факторів.

Встановлено, що максимальна ефективність формування механічного зв'язку досягається при куті нахилу стінок пазів близько 30°, що забезпечує оптимальний розподіл напружень у зоні контакту. Порівняння експериментальних і теоретичних результатів підтвердило адекватність розробленої математичної моделі та високу прогностичну здатність чисельних методів. Показано доцільність використання інтегрованих CAD/CAE-систем і паралельних обчислень (на базі багатоядерних CPU та GPU) для прискорення розрахунків методом скінченних елементів і проведення багатofакторної оптимізації. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні ефективних технологій виробництва біметалічних матеріалів із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: біметалічні листи, прокатка, механічне з'єднання, затікання металу, поздовжні пази, ступінь обтиснення, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, чисельне моделювання, CAD/CAE-системи, паралельні обчислення, оптимізація технологічних параметрів.

Mikheienko Denys. Experimental study of the process of obtaining two-layer bimetallic sheets with a mechanical bond

The paper presents the results of an experimental and theoretical study of the formation of mechanical bonding in the production of two-layer bimetallic sheets by rolling. The relevance of the research is обусловлена the growing demand for modern structural materials with a specified set of operational and technological properties, which can be achieved through the development of layered composites. A technological scheme for producing bimetal based on the joint reduction of workpieces with the preliminary formation of longitudinal grooves on a stronger substrate is proposed, ensuring reliable mechanical bonding due to the flow of a more ductile metal into the grooves without the use of high-temperature processes.

Experimental studies were carried out using an industrial laboratory rolling mill and a set of measuring equipment, which made it possible to vary the main technological parameters of the process, including the reduction ratio, groove geometry, contact friction conditions, and physical and mechanical properties of the materials. The research was conducted in two directions: physical modeling of metal plastic flow into grooves and simulation of the actual formation of a bimetallic joint of the "steel – soft metal" type. Experimental dependencies of rolling force parameters and groove filling depth on technological factors were obtained.

It was established that the maximum efficiency of mechanical bonding is achieved at a groove wall inclination angle of about 30°, which ensures an optimal stress distribution in the contact zone. A comparison of experimental and theoretical results confirmed the adequacy of the developed mathematical model and the high predictive capability of numerical methods. The feasibility of using integrated CAD/CAE systems and parallel computing (based on multi-core CPUs and GPUs) to accelerate finite element analysis and perform multi-parameter optimization is demonstrated. The obtained results can be used in the design of efficient technologies for the production of bimetallic materials with enhanced performance characteristics.

Key words: bimetallic sheets, rolling, mechanical bonding, metal flow, longitudinal grooves, reduction ratio, stress-strain state, finite element method, numerical modeling, CAD/CAE systems, parallel computing, process parameter optimization.

Постійна зростаюча потреба в нових конструкційних матеріалах, які поєднують складний комплекс експлуатаційних і технологічних властивостей, зумовлює необхідність системного підходу до проектування шаруватих композитів і розроблення ефективних технологічних схем їх виробництва.

Одним із перспективних механічних способів з'єднання металів є прокатка. Цим методом можна отримувати двошарові біметалічні листи. Типовим прикладом є спільне обтиснення двох листів, коли на міцнішій підкладці попередньо нарізають поздовжні пази. При цьому м'якіший метал під дією тиску затікає в щілинні порожнини, забезпечуючи надійний механічний зв'язок між шарами без застосування високих температур чи хімічної активації поверхні [1].

Експериментальні дослідження проводилися з метою уточнення вихідних передумов теоретичної моделі, а також всебічної оцінки ступеня достовірності та адекватності отриманих теоретичних рішень.

Для досягнення поставленої мети застосовувався комплекс різних методик, сучасних експериментальних установок і високоточного обладнання. Це дозволило максимально повно охопити весь діапазон можливих умов реалізації розглянутих технологічних процесів – від мінімальних до максимальних значень ступеня обтиснення, коефіцієнтів тертя, геометричних параметрів пазів та фізико-механічних характеристик матеріалів.

Такий системний підхід [2] забезпечив не лише якісну перевірку теоретичних припущень, побудованих на основі чисельних методів [3; 4]: чисельного рекурентного розв'язання кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного об'єму, методу полів ліній ковзання, методу кінцевих елементів та варіаційних методів, але й кількісне визначення меж їхньої застосовності, виявлення можливих відхилень у реальних умовах деформування та встановлення оптимальних технологічних режимів отримання двошарових біметалічних листів з надійним механічним зв'язком.

Результати експериментів слугували основою для корекції математичної моделі, підвищення її прогностичної точності та розроблення практичних рекомендацій щодо промислового впровадження запропонованої технології.

Аналіз сучасних літературних джерел, присвячених експериментальним дослідженням процесів прокатного з'єднання та формування багатошарових металевих композитів, показує, що ключові закономірності формування зчеплення встановлені на основі комплексних

експериментів із використанням мікроструктурного аналізу, механічних випробувань та чисельного моделювання: доведено, що утворення міцного інтерфейсу відбувається внаслідок інтенсивної пластичної деформації, руйнування оксидних плівок і контакту «чистих» металевих поверхонь з подальшою дифузійною взаємодією на атомному рівні [5]; експериментальні роботи підтверджують, що ступінь деформації, температура, швидкість прокатування та стан поверхні є визначальними факторами міцності з'єднання, а результати добре узгоджуються з чисельними моделями процесу [6]; при цьому дослідження методів accumulative roll bonding і багатопрхідного прокатування демонструють суттєве подрібнення зерен, формування ультрадрібної та наноструктури і відповідне підвищення міцності матеріалів, що пояснюється поєднанням механічного та металургійного механізмів зчеплення [7]; додатково експериментально встановлено, що оптимізація технологічних параметрів (ступеня обтиснення, температури, кількості циклів) і підготовки поверхні дозволяє значно покращити якість інтерфейсу, тоді як їх невідповідність призводить до дефектів, розшарування та зниження міцності, що підтверджує необхідність комплексного підходу до керування процесом формування багатошарових композитів.

Експериментальні дослідження процесу затікання металу в щілинну порожнину проводилися у двох основних напрямках. Перший напрямок полягав у фізичному моделюванні на свинцевих зразках шляхом прокатки між гладким валком і каліброваним валком з нанесеними на його поверхні поздовжніми пазами. Другий напрямок передбачав пряме моделювання біметалічного з'єднання – спільну холодну прокатку свинцевих зразків зі сталеву плиту, на якій були попередньо фрезеровані поздовжні пази. Таке поєднання методик дозволило окремо вивчити закономірності пластичного течіння металу в пази та оцінити особливості формування механічного зв'язку в реальній біметалічній системі «сталь – м'який метал».

В якості основного обладнання при проведенні досліджень застосовувався промислово-лабораторний стан Донбаської державної машинобудівної академії з типорозміром валкового вузла 260x200, призначений для листової прокатки відносно товстих заготовок. Нижній валок стану був виконаний конструкція представлений на рисунку 1. Також вхід досліджень використовувалася сталеві плита, в якій, з метою дослідження впливу поздовжніх пазів з кутами нахилу в діапазоні від 0 до 45° і кроком 5° (рис. 2).

Таблиця 1

Вихідні дані та результати прокатки свинцевих зразків між гладким та каліброваним робочими валками

№	h_0 , мм	l_0 , мм	h_{12} , мм	l_1 , мм	h_{11} , мм	P , кН	M , кН*м
1	10,45	50	10,11	51,75	9,91	2,76	65,3
2	10,35	50	9,96	54,5	9,36	6,57	134
3	10,44	50	9,74	56	8,74	8,64	191
4	10,21	50	9,41	58	8,11	11,76	326
5	10,27	50	9,25	61	7,55	14,52	435
6	10,37	50	9,1	64	7,1	18,33	549
7	10,46	50	8,91	65	6,61	24,21	745
8	10,41	50	8,77	67	6,17	25,59	767
9	10,17	50	8,64	69	5,74	28,36	850
10	10,15	50	8,47	71	5,37	40,12	1396
11	9,94	50	8,05	77	4,75	41,85	1411
12	9,94	50	8,37	72	5,17	41,16	1429
13	10,2	50	8,48	71	5,38	41,16	1438

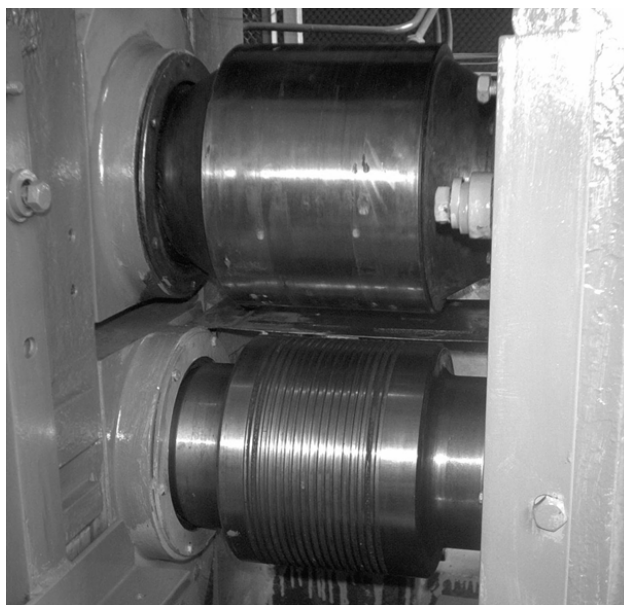


Рис. 1. Загальний вигляд робочої кліті реверсивного прокатного стану 200 ДДМА з новим нижнім каліброваним робочим валком

Енергосилові параметри представлені у вигляді емпіричних та розрахункових розподілів залежностей сили та моменту прокатки від відносного обтиснення, представлені на рисунках 3, а і 3, б відповідно.

Спільна холодна прокатка свинцевих модельних зразків зі сталеву плитою, що мала попередньо фрезеровані поздовжні пази, проводилася з метою експериментального визначення оптимального кута нахилу стінок пазів,

при якому досягається максимальна глибина затікання м'якого металу.

Отримані експериментальні залежності глибини заповнення пазів (hп) від ступеня обтиснення для різних кутів нахилу стінок пазів (30°, 45°, 60° та 75°) наведено на рисунку 4.

Аналіз отриманих експериментальних залежностей свідчить, що найбільша глибина затікання м'якого металу в паз спостерігається при куті нахилу його стінки до вертикалі $\alpha = 30^\circ$. При цьому значенні кута паз заповнюється найбільш ефективно в усьому дослідженому діапазоні ступенів обтиснення. Збільшення або зменшення кута α відносно оптимального призводить до зниження глибини затікання.

Висновки:

– порівняльний аналіз картин механіки затікання металу в нахилений паз, одержаних експериментально та розрахунковим шляхом, демонструє достатньо високу ступінь достовірності розробленої математичної моделі. Крім того, результати експериментальних досліджень інтегральних енергосилових характеристик і витяжки при прокатці між гладким і профільованим робочими валками, виконані на

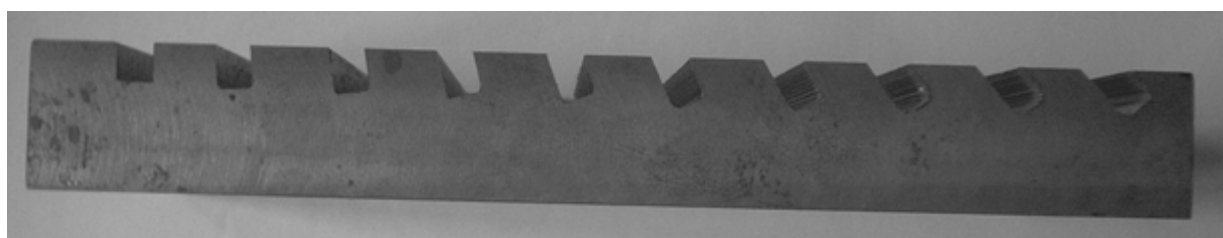


Рис. 2. Загальний вид плити з поздовжніми похилими пазами

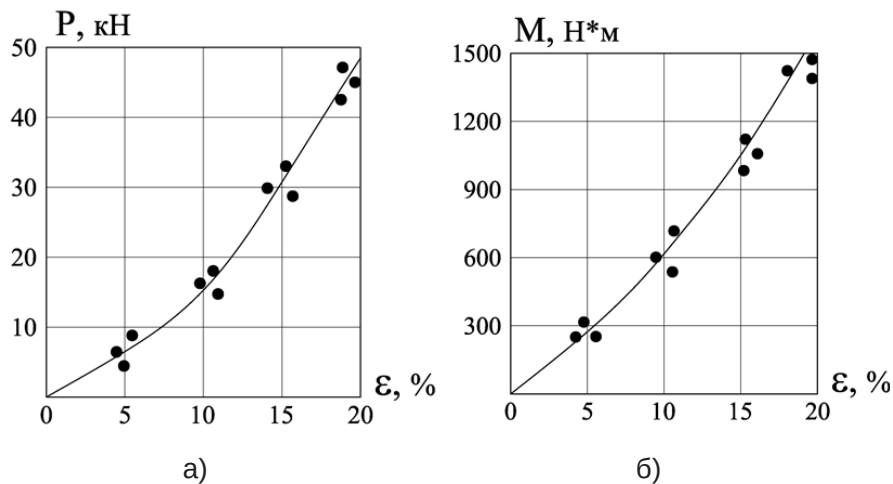


Рис. 3. Емпіричні (●) та розрахункові (—) залежності сили: а) та моменту прокатки б) від відносного обтискання при прокатці між гладким та каліброваними валками

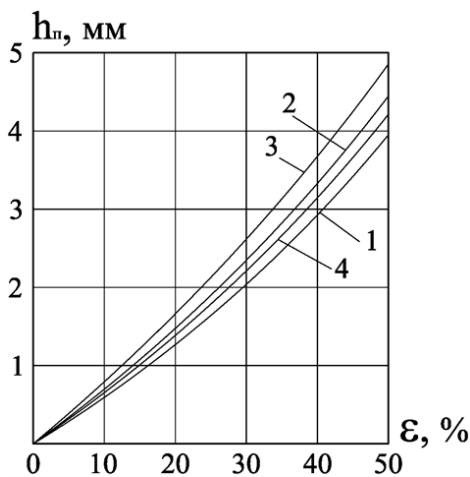


Рис. 4. Емпіричні розподіли залежності глибини заповнення пазів h_n від обтискання ε для пазів з різними кутами нахилу α : 1 – $\alpha = 10^\circ$, 2 – $\alpha = 20^\circ$, 3 – $\alpha = 30^\circ$, 4 – $\alpha = 40^\circ$

промислово-лабораторному прокатному стані 260×200 ДГМА, як кількісно, так і якісно добре узгоджуються з даними тривимірного теоретичного аналізу;

– отримані дані підтверджують правильність основних теоретичних припущень, адекватність застосування методу полів ліній ковзання, чисельного рекурентного розв'язання кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги, методу кінцевих елементів та варіаційних методів. Це дозволяє зробити висновок про високу прогностичну здатність розробленої моделі та її придатність для інженерних розрахунків при проектуванні технології виробництва двохшарових біметалічних листів з механічним зв'язком;

– у подальшому планується активне використання інтегрованих систем CAD/CAE

(Computer-Aided Design / Computer-Aided Engineering), зокрема програмного комплексу ABAQUS [8-10] у поєднанні з CAD-системами (наприклад, SolidWorks, Creo або CATIA), для віртуального моделювання процесу затікання металу в щілинну порожнину та формування механічного зв'язку. Моделювання на основі методу кінцевих елементів у САЕ-середовищі дозволить проводити швидко багатofакторну оптимізацію геометричних параметрів пазів (кута розкриття, глибини, кроку), ступеня обтиснення, умов контактного тертя та інших технологічних режимів уже на стадії проектування. Інтеграція CAD і CAE забезпечить безшовний перехід від параметричного 3D-моделювання геометрії інструменту та заготовки безпосередньо до детального аналізу напружено-деформованого стану, що суттєво скоротить обсяг натурних експериментів, знизить матеріальні та часові витрати й значно прискорить впровадження технології виробництва двохшарових біметалічних листів у промислове виробництво. Додатково слід зазначити, що задачі, які розв'язуються в рамках методу скінченних елементів, характеризуються значною обчислювальною складністю та великою кількістю ітераційних операцій, що обумовлює доцільність застосування паралельних обчислень. Використання багатоядерних центральних процесорів (CPU) та графічних процесорів (GPU) дозволяє ефективно розпаралелювати обчислення, скоротити час розрахунку складних термомеханічних задач і забезпечити можливість проведення багатоваріантного чисельного експерименту в режимі, наближеному до реального часу, що є важливим для оптимізації технологічних параметрів і впровадження концепції цифрового проектування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Патент 21238 України МПК В 23 К 20/04. Спосіб виробництва двошарових біметалевих листових композицій / В.А. Федорінов, О.В. Сатонін, А.О. Сатонін, Д.Ю. Міхеєнко; Донбаська державна машинобудівна академія. No 2006 07687; заявл. 10.07.06; опубл. 15.03.07, Бюл. No 3. 8 с.
2. Основи системного аналізу. Конспект лекцій : Методичні рекомендації з дисципліни "Системний аналіз" / укладачі: Цибко Г.Ю., Горошко Ю.В. Чернівці: НУЧК, 2025, 117 с.
3. Міхеєнко Д. Ю., Грудкіна Н. С. Теоретичні дослідження процесу виробництва прокаткою відносно товстих двошарових біметалевих листових заготовок з механічним з'єднанням. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2024. № 1. С. 7–12. URL: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-1>
4. Міхеєнко Д. Ю., Грудкіна Н. С., Герасименко О. В. Комп'ютерне та чисельне моделювання термомеханічного стану біметалевих конструктивних елементів. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 145–150. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-16>
5. Li Z.et al. Recent advances and trends in roll bonding c bonding model: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.07.004>
6. Rezaii A.et al. Experimental & theoretical investigation of roll bonding process of multilayer strips by finite element method. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 54. P. 54–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.044>
7. Ghalehandi S. M., Malaki M., Gupta M. Accumulative Roll Bonding–A Review. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 17. P. 3627. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9173627>
8. Che J.et al. Prediction Model Study of Rolling Force and Thickness Ratio of the Bimetallic Composite Plate. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 38, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01201-1>
9. Wu S.et al. Simulation and Experiment of Stainless Steel - Carbon Steel Cladding Rebar Rolling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 740. P. 012178. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/740/1/012178>
10. Song J. et al. Finite Element Simulation and Microstructural Analysis of Roll Forming for DP590 High-Strength Dual-Phase Steel Wheel Rims. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 15. P. 3795. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17153795>

REFERENCES:

1. Fedorinov, V. A., Satonin, O. V., Satonin, A. O., & Mikheienko, D. Yu. (2007). *Sposib vyrobnytstva dvosharovykh bimetalovykh lystovykh kompozitsii* [Method for production of double-layer bimetallic sheet compositions] (UA Patent No. 21238). Ukrainian Intellectual Property Institute. [in Ukrainian].
2. Tsybko, H. Yu., & Horoshko, Yu. V. (2025). *Osvony systemnoho analizu. Konspekt leksii: Metodychni rekomendatsii z dystsypliny "Systemnyi analiz"* [Fundamentals of systems analysis. Lecture notes: Methodological recommendations for the discipline "Systems Analysis"]. NUCHK. [in Ukrainian].
3. Mikheienko, D. Yu., & Hrudkina, N. S. (2024). Teoretychni doslidzhennia protsesu vyrobnytstva prokatkoiu vidnosno tovystrykh dvosharovykh bimetalovykh lystovykh zahotivok z mekhanichnym ziednanniam [Theoretical studies of the production process by rolling relatively thick two-layer bimetallic sheet blanks with a mechanical joint]. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, (1), 7–12. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-1> [in Ukrainian].
4. Mikheienko, D. Yu., Hrudkina, N. S., & Herasymenko, O. V. (2025). Kompiuterne ta chyselne modeliuвання termomekhanichnoho stanu bimetalovykh konstruktivnykh elementiv [Computer and numerical modeling of the thermomechanical state of bimetallic structural elements]. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, (5), 145–150. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-16> [in Ukrainian].
5. Li, Z., Guo, L., Huang, H., Yu, H., & Zhao, J. (2022). Recent advances and trends in roll bonding bonding model: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.07.004>
6. Rezaii, A., Salehi, M. T., & Seyedein, S. H. (2020). Experimental & theoretical investigation of roll bonding process of multilayer strips by finite element method. *Journal of Manufacturing Processes*, 54, 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.044>
7. Ghalehandi, S. M., Malaki, M., & Gupta, M. (2019). Accumulative roll bonding–A review. *Applied Sciences*, 9(17), 3627. <https://doi.org/10.3390/app9173627>
8. Che, J., Zhao, J., & Ma, L. (2025). Prediction model study of rolling force and thickness ratio of the bimetallic composite plate. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 38(1). <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01201-1>
9. Wu, S., Jiang, Z., & Wei, D. (2020). Simulation and experiment of stainless steel - carbon steel cladding rebar rolling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 740(1), 012178. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/740/1/012178>
10. Song, J., Wang, Y., & Liu, X. (2024). Finite element simulation and microstructural analysis of roll forming for DP590 high-strength dual-phase steel wheel rims. *Materials*, 17(15), 3795. <https://doi.org/10.3390/ma17153795>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 621.791

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-9>

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Пашинський Володимир Вікторович,

доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-0118-4748

Бойко Ігор Олександрович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-7742-4694

В роботі представлено результати аналізу сучасних досліджень в напрямках розробки перспективних матеріалів для наплавлення деталей металургійного устаткування, до яких висуваються вимоги високої стійкості при абразивному зношуванні (деталі завантажувальних пристроїв доменних печей, газорозподільних клапанів, бункерів та сит). Базовими системами для таких застосувань є Fe – Cr – C, Fe – Cr – C – B, Ni – Cr – C – B, які додатково легуються сильними карбідоутворюючими елементами (Mo, W, V, Nb, Ti).. При виборі матеріалів слід враховувати, що реальні характеристики матеріалів для наплавлення залежать не тільки від хімічного складу, але й від мікроструктури, яка сформувалася в процесі наплавлення. Крім хімічного складу, ефективним інструментом керування формуванням мікроструктури та комплексу властивостей сплавів є за управління енергетичними параметрами процесу формування покриття, температурний режим наплавлення, геометричні параметри шарів при багат шаровій структурі покриття. Запропоновано виділити основні групи матеріалів для наплавлення: економічно легировані високохромисті високовуглецеві матеріали на основі заліза, високохромисті матеріали з додатковим легуванням сильними карбідоутворюючими елементами для роботи при високих температурах У випадках, коли велике значення має збереження твердості, зносостійкості та стійкості до термоциклічного навантаження напавленого шару при високих температурах, перспективними є сплави на нікелевій основі. В умовах відносно низьких температур перспективними є низьковуглецеві матеріали з пониженим вмістом хрому, зносостійкість яких забезпечується формуванням не тільки карбідної фази, але й твердої мартенситної матриці. Наведені приклади конкретних матеріалів вказаних груп для наплавлення.

Ключові слова: наплавлення, твердість, зносостійкість, карбіди, бориди, аустенітна матриця, мартенситна матриця, тріщини розвантаження, теплостійкість, механічна обробка.

Pashynskiy Volodymyr, Boyko Igor. The choice of materials for hardfacing of metallurgical equipment parts, working at abrasive wear conditions at high temperatures

The paper presents the results of the modern research analysis in the areas of development of promising materials for surfacing of metallurgical equipment parts, which require high resistance to abrasive wear (parts of blast furnace loading devices, gas distribution valves, bunkers and sieves). The basic systems for such applications are Fe – Cr – C, Fe – Cr – C – B, Ni – Cr – C – B, which are additionally alloyed with strong carbide-forming elements (Mo, W, V, Nb, Ti). When choosing materials, it should be considered that the real characteristics of materials for surfacing depend not only on the chemical composition, but also on the microstructure formed during the surfacing process. In addition to the chemical composition, an effective tool for controlling the formation of the microstructure and the complex of alloy properties is the control of the energy parameters of the coating formation process, the surfacing temperature regime, and the geometric parameters of the layers in a multilayer coating structure. It is proposed to distinguish the main groups of materials for surfacing: economically alloyed high-chromium high-carbon materials based on iron, high-chromium materials with additional alloying with strong carbide-forming elements for operation at high temperatures. In cases where the keeping of hardness, wear resistance and resistance to thermocyclic loading of the surfacing layer at high temperatures is of great importance, nickel-based alloys are promising. In conditions of relatively low temperatures, low-carbon materials with a reduced chromium content are promising, the wear resistance of which is ensured by the formation of not only a carbide phase, but also a hard martensitic matrix. Examples of specific materials of the specified groups for the surfacing are given.

Key words: surfacing, hardness, wear resistance, carbides, borides, austenitic matrix, martensitic matrix, unloading cracks, high temperature strength, machining.

Вступ. У даній роботі будуть представлені результати досліджень, метою яких було визначення сучасних тенденцій у розробці матеріалів для зносостійкого наплавлення деталей металургійного устаткування, які працюють в умовах абразивного зношування в поєднанні з впливом високих температур (до 650–700 °C) та агресивного газового середовища. Це, зокрема, деталі завантажувальних пристроїв доменних печей, газорозподільних клапанів, бункерів та сит. Вони працюють в контакт з високоабразивними шихтовими матеріалами, але температура цих матеріалів, їх абразивні характеристики питомі навантаження, хімічна активність шихти та газового середовища можуть змінюватися в широких межах. Це вимагає вибору матеріалу для наплавлення з урахуванням умов роботи конкретної деталі. Додатковими факторами є також велика матеріалоємність багатьох деталей та технологічна складність їх заміни у випадку виходу з ладу. Тому виникають суперечливі вимоги до зниження ціни матеріалу для наплавлення та одночасного забезпечення високої надійності наплавленого шару та високої продуктивності процесу наплавлення.

Вищезгадані особливості деталей, що наплавляються, утруднюють, або роблять неможливим проведення натурних експериментів безпосередньо на промислових агрегатах. Тому важливо частиною процесу вибору матеріалу наплавленого шару є аналіз наявної науково-технічної інформації з метою визначення найбільш перспективних систем для подальшого експериментального дослідження. В літературі існує великий об'єм інформації щодо можливих варіантів технологій наплавлення та складу матеріалів, які для цього використовуються.

В роботі [1] детально розглянуті процеси наплавлення, які включають плазмове дугове наплавлення, наплавлення під флюсом, лазерне наплавлювання, процеси, пов'язані з дуговим наплавленням з використанням трубчастих дротів, киснево-ацетиленове полум'яне наплавлення. При цьому, в якості основних матеріалів, розглянуті порошкові дроти та стрічки на основі двох систем, що використовуються для зносостійких наплавлень: нікелевій основі з додаванням частинок карбіду вольфраму та залізній основі, в якій карбіди хрому типу M_7C_3 утворюють зародки під час затвердіння. В роботі [2] значна увага присвячена проблемам легування цих базових систем для підвищення їх ефективності при експлуатації у конкретних умовах. Було проведено систематичний огляд для вивчення впливу різних

легуючих елементів, включаючи бор, вуглець, хром, марганець, молібден, ніобій, рідкісноземельні елементи, кремній, титан та ванадій, на характеристики зносостійких покриттів сплавів на основі заліза. Автори роботи дають рекомендації щодо перспективних систем легування.

Вказаний підхід знаходить розвиток у роботах присвячених експериментальному дослідженню перспективних систем легування. Так, в роботі [3] проаналізовано новий тип зносостійкого сплаву з системою Fe-Cr-C-Mo-B. Встановлено, що бор заміщує вуглець у карбідах M_7C_3 та Mo_2C , утворюючи карбід $M_7C_{3-x}B_x$ та $Mo_2(C_{1-x}B_x)$. Встановлено, що елемент В у сплавах для наплавлення виконує дві ролі: перша – це заміщення у твердому розчині елемента С, який має близький атомний номер до В, і, нарешті, утворення $M_7C_{3-x}B_x$ та $Mo_2(C_{1-x}B_x)$ у сплавах. Друга роль – це утворення твердих фаз M_2B , розподілених у сплавах. Метою роботи [4] було отримання зносостійкого покриття шляхом наплавлення порошковими електродами багатокомпонентної системи Fe-Ti-Mo-B-Cu. Методом рентгеноструктурного фазового аналізу встановлено, що в сплаві крім складних карбідів та боридів формуються також карбіди титану TiC , які грають роль центрів зародження інших твердих фаз.

У випадках, коли велике значення має збереження твердості та зносостійкості наплавленого шару при високих температурах, перспективними є сплави на нікелевій основі. В роботі [5] показано, що використання сплаву на основі нікелю Colmonoy 6 з буферним шаром SS-309L на сталі P91 (CoSP91) забезпечує покращену зносостійкість на 67% за підвищених температур (600°C) Це збільшення зумовлене утворенням твердих фаз Cr_7C_3 , Cr_2B та Cr_5B_3 , а також захисного оксидного шару, які разом покращують зносостійкість.

Таким чином, розвиток матеріалів для наплавлення привів до появи складнолегованих варіантів системи Fe – Cr – C, Fe – Cr – C – B, Ni – Cr – C – B. Але важливим моментом є встановлений багатьма дослідниками факт, що реальні характеристики матеріалів для наплавлення залежать не тільки від хімічного складу, але й від мікроструктури, яка сформувалася в процесі наплавлення. На це звертали увагу автори робіт [3; 4; 6]. Мікроструктурні дослідження наплавленого шару, проведені в роботі [6], показали, що мікроструктура сплаву складається з великої об'ємної частки первинних карбідів ніобію, хаотично розподілених в евтектичній матриці, що складається з метастабільного аустеніту (γ) та евтектичних карбідів M_7C_3 ,

а також з високої об'ємної частки первинного M_7C_3 . Випробування на абразивне зношування при низьких та високих напруженнях показали, що розроблений наплавлений сплав Fe–Cr–C–Nb демонструє покращену стійкість до абразивного зношування порівняно зі звичайним високовуглецевим/високохромовим сплавом для наплавлення з вищою твердістю та вищою об'ємною часткою первинного M_7C_3 .

В роботі [7] автори цілеспрямовано керували структуроутворенням шляхом зниження температури наплавленого шару перед нанесенням неступного та використовували фінальну обробку холодом. Встановлено, що температура кінцевого охолодження показала значний вплив на фазовий склад матриці. Покриття, охолоджені повітрям, демонстрували аустенітну матрицю, тоді як наплавлений шар, охолоджений до $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ рідким азотом, демонстрував змішану матрицю аустеніту та мартенситу. Такий шар продемонстрував найкращу зносостійкість, яка була в 2,05 рази вищою, ніж у нанесеного за звичайною технологією.

Значний інтерес мають результати, отримані авторами роботи [8], в якій досліджувалась можливість керування мікроструктурою сплаву за рахунок зміни енергетичних параметрів процесу нанесення покриття. Зварювальний струм у режимі плазмового нанесення покриття ефективно формує евтектичні мікроструктури в плакуваннях з складнолегованого матеріалу для наплавлення системи Fe–Co–Ni–Cr–Mo. Дисперсна пластинчаста евтектична структура $\sigma/\text{ГЦК}$ досягається при оптимізованому струмі 135 А. Евтектична структура демонструє добру стійкість до впливу високої температури та стабільні характеристики опору зношуванню.

Аналогічний підхід був використаний авторами роботи [9] при використанні методу дугового наплавлення сплаву системи Fe – Cr – C – B в роботі був використаний високолегований порошковий дріт, з високою концентрацією C та Cr, що використовується для отримання багатшарового наплавлення на низьковуглецеву сталеву основу. Високолегований порошковий дріт збільшив твердість зі 140 до 700 HV шляхом формування карбідів великої кількості карбідів типу M_7C_3 . Були ідентифіковані механізми формування мікроструктури, які безпосередньо визначаються хімічним складом дроту в поєднанні з геометричними параметрами шарів, що наплавляються та кінетикою процесу наплавлення. Ці результати є багатообіцяючими, оскільки вони можуть розширити потенційне застосування твердосплавних матеріалів там, де потрібне покращене поглинання енергії.

Ще одним важливим моментом є встановлена авторами роботи [10] залежність зносостійкості твердих наплавлених матеріалів від питомого навантаження при зношуванні. В роботі досліджували зношування твердого наплавлення на основі Fe–Cr–C та складного сплаву Fe–Cr–Mo–Nb–W–C як за кімнатної температури, так і за $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, під різними нормальними навантаженнями для моделювання різних умов експлуатації. Наплавлення Fe–Cr–C демонструє виражену реакцію на зростання навантаження, тоді як комплексний сплав демонструє порівняно незначні зміни зі збільшенням навантаження. Підвищення температури до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ знижує швидкість зношування обох матеріалів, що пояснюється підвищеною пластичністю наплавлень Fe–Cr–C за підвищеної температури, але складнолегований сплав зберігає вищу зносостійкість.

В результаті аналізу інформації можна зробити висновок, що для підвищення ресурсу роботи деталей металургійного устаткування перспективним є використання складнолегованих сплавів на основі систем Fe – Cr – C з додатковим легуванням сильними карбидоутворювачами – Mo, W, Nb. У випадку, коли деталі працюють в умовах термоциклічного навантаження і до них висувається вимога забезпечення герметичності, більш перспективним є використання сплавів системи Fe – Cr – C – Ni, або системи Cr – C – Ni – B.

Задачею даного дослідження було визначення конкретних марок сплавів, які є доступними на ринку, та розробка рекомендації по їх використанню в практиці виготовлення та відновлення деталей металургійного устаткування.

Матеріали та методики дослідження. Пошук перспективних марок матеріалів для наплавлення виконували шляхом аналізу пропозицій компаній – виробників матеріалів для наплавлення з урахуванням практики металургійних та ремонтних підприємств. При виборі матеріалів також враховували їх технологічність, та можливість виготовлення у потрібному форм-факторі (дрот або стрічка).

Результати та їх обговорення. Аналіз літературних даних та інформації, доступної в мережі, показав, що основними виробниками матеріалів для наплавлення, які відповідають критеріям, визначеним вище, є ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК», DURUM Verschleißschutz GmbH, Corodur Fülldraht GmbH, Voestalpine Bohler Welding, Kladex Ltd. Важливо відзначити, що виробництво матеріалів для наплавлення у форм факторі порошкової стрічки широко представлено лише у компанії ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК», тоді як інші

компанії зосереджені на виробництві матеріалів для наплавлення у вигляді порошкового дроту діаметром 1,6 – 2,8 мм. Матеріал у формі стрічки дозволяє потенційно забезпечити вищу продуктивність процесу наплавлення, що є конкурентною перевагою при наплавленні великогабаритних деталей, наприклад конусів завантажувальних пристроїв доменних печей.

Аналіз сортаменту продукції виробників показав, що матеріали для наплавлення з урахуванням вимог до деталей металургійного устаткування можна розділити на такі основні групи.

Матеріали з економним легуванням та максимальною зносостійкістю при помірних ($< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах. Вони базуються на системі Fe – Cr – C. Хімічний склад типових марок матеріалів приведено в таблиці 1.

Якщо деталі мають працювати при температурах 600–750 $^{\circ}\text{C}$, перспективними виглядають більш леговані варіанти матеріалів на основі заліза, склад яких наведений в таблиці 2.

Обидві групи сплавів забезпечують отримання твердості наплавленого шару не нижче 62 – 63 HRC, яка виключає можливість механічної обробки наплавленого шару, можливе тільки шліфування абразивним інструментом. Також

особливістю наплавленого шару є виникнення так званих «тріщин розвантаження» внаслідок значної різниці у коефіцієнтах температурного розширення ферито-перлітного матеріалу основи деталі та аустеніто-карбідного наплавленого шару. Це явище не знижує зносостійкості шару, але утруднює виготовлення газоцільних вузлів устаткування внаслідок розгерметизації по тріщинам. Крім того, газоцільні вузли виготовляються із значним об'ємом механічної обробки контактних поверхонь. Тому для таких деталей перспективними є матеріали на залізо-нікелевій та нікелевій основі. Склад таких матеріалів наведений в таблиці 3.

Додатковою перевагою матеріалів на нікелевій основі є висока корозійна стійкість та можливість роботи при температурах 600–750 $^{\circ}\text{C}$. Але такі матеріали значно дорожчі за сплави розглянуті раніше матеріали на основі заліза. Тому, якщо умови експлуатації не пов'язані з дією високих температур, перспективною виглядає система Fe – Cr – C зі зниженим вмістом вуглецю та хрому. Приклади хімічного складу таких матеріалів наведені у таблиці 4. Додатковою перевагою цієї системи є її висока технологічність при обробці різанням та низька схильність до утворення «тріщин розвантаження».

Таблиця 1

Хімічний склад економнолегованих матеріалів на основі заліза для наплавлення (% ваг.)

Марка	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V	W	B
SK A43-O	5,6	1,3	0,2	20	-	6,7	-	-	-
DURMAT FD 64	4,5	1,0	1,5	24	-	-	0,8	0,8	1,0
KLADDEX W37-O	5,0	1,2	0,2	22	-	6,5	-	-	0,9
ПЛ АН 180	4,5	-	-	30	1,0	-	-	-	-

Таблиця 2

Хімічний склад теплостійких матеріалів на основі заліза для наплавлення (% ваг.)

Марка	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V	W	B
SK A45-O	5,3	0,7	0,2	21	5,3	6,1	1,0	1,9	-
DURMAT FD 65	5,2	1,0	0,4	21	7,0	7,0	1,0	2,0	-
ПЛ АН 179	5,0	-	-	22	6,0	7,0	1,0	2,0	-

Таблиця 3

Хімічний склад матеріалів на основі нікелю для наплавлення деталей, що потребують механічної обробки (% ваг.)

Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V	W	B
COROLOY 1/58	0,75	4,7	-	20	Осн.	-	-	-	-	3,2
COROLOY 12/50	0,6	4,9	-	20	Осн.	2,5	-	-	-	2,8
ПЛ АН 111	5,0	2,5	1,0	38	38	-	-	-	-	0,3

Таблиця 4

Хімічний склад матеріалів на основі заліза з мартенситною матрицею для наплавлення (% ваг.)

Марка	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V	W	B
KLADDEX L55-O	0,5	2,2	2,2	8	-	-	-	-	-
ROBOTIC 600	0,45	0,4	3,0	9	-	-	-	-	-
ROBOTIC 603	0,5	1,1	1,0	6	1,3	-	0,3	1,3	-

Це пов'язано з формуванням мартенситної матриці сплаву з близьким коефіцієнтом термічного розширення до матеріалу основи деталей.

Висновки. В результаті проведеного аналізу були визначені сучасні тенденції в розробці матеріалів для наплавлення деталей металургійного устаткування і визначений склад перспективних матеріалів для наплавлення в залежності від умов експлуатації та технічних вимог до деталей устаткування.

На основі аналізу літературних даних та з урахуванням практичного досвіду можна стверджувати, що кінцева структура і комплекс властивостей наплавлених шарів буде залежати від технологічного режиму наплавлення конкретних деталей. Тому перед впровадженням рекомендованих матеріалів необхідно провести комплекс лабораторних досліджень для відпрацювання технологічних процесів виготовлення та відновлення деталей устаткування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Mendez P.F., Barnes N., Bell K., Borle S.D., Gajapathi S.S., Guest S.D., Izadi H., Gol A.K., Wood G. Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 16, Issue 1, January 2014, Pages 4-25, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>
2. Singla Y.K., Maughan M.R., Arora N., Dwivedi D.K. Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects. *Journal of Manufacturing Processes* Volume 120, 30 June 2024, Pages 135-160. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.038>
3. Ding T., Li C., Jing W., Di X., Hu W. Influences of boron on the microstructural characteristics and wear performance of hypereutectic Fe-Cr-C-Mo-xB hardfacing alloy. *Surface and Coatings Technology*. Volume 478, 29 February 2024, 130415. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130415>
4. Ivanov O., Prysyazhnyuk P., Shlapak L., Marynenko S., Bodrova L., Kramar H. Researching of the structure and properties of FCAW hardfacing. based on Fe-Ti-Mo-B-C welded under low current. 1st Virtual International Conference "In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction" *Procedia Structural Integrity* 36 (2022) 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.028>
5. Naik H., Bhoskar A., Kalyankar V., Deshmukh D. Nickel-based metallurgical coating architectures for superior wear resistance in high-temperature P91 steel applications. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems* Volume 9, March 2025, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100151>
6. Correa E.O., Alcântara N.G., Valeriano L.C., Barbedo N.D., Chaves R.R., The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process. *Surface and Coatings Technology* Volume 276, 25 August 2015, Pages 479-484. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.026>
7. Zhang J., Wei J., Wei S., Huang Z., Xu L., Wei W., Gao Z., Shi Y. Effect of interlayer temperature and extremely low terminal cooling temperature on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing alloy. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 23, March–April 2023, Pages 4105-4116. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.012>
8. Wu J.Z., Zhang S.H., Meng X.P., Sun R.H. and oth. Unraveling the high-temperature wear mechanisms of FeCoNiCrMo HEA claddings: the critical role of eutectic microstructure. *Wear*. Volume 593, 15 May 2026, 206652. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2026.206652>
9. Monnet A., Fras T., Kazup A., Bahi S., Rusinek A., Guitton A. Multi-scale characterization of a high chromium-carbon based hardfacing alloy welded by flux-cored arc welding. *Materials Characterization*. Volume 233, March 2026, 116038. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2026.116038>
10. Katsich C., Rojacz H., Hajas B., Kirnbauer A., Varga M., Mayrhofer P.H. Load-dependent mild abrasive wear behavior of Fe-Cr-C-based hardfacings at room and elevated temperatures. *Wear*. Available online 8 April 2026, 206723 In Press, Journal Pre-proof. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2026.206723>

REFERENCES:

1. Mendez, P.F., Barnes, N., Bell, K., Borle, S.D., Gajapathi, S.S., Guest, S.D., Izadi, H., Gol, A.K., Wood, G. (2014) Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 16, Issue 1, January, Pages 4-25, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.011>
2. Singla, Y.K., Maughan, M.R., Arora, N., Dwivedi, D.K. (2024) Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects. *Journal of Manufacturing Processes* Volume 120, 30 June, Pages 135-160. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.038>
3. Ding, T., Li, C., Jing, W., Di, X., Hu, W. (2024) Influences of boron on the microstructural characteristics and wear performance of hypereutectic Fe-Cr-C-Mo-xB hardfacing alloy. *Surface and Coatings Technology*. Volume 478, 29 February, 130415 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130415>

4. Ivanov, O., Prysyzhnyuk, P., Shlapak, L., Marynenko, S., Bodrova, L., Kramar, H. (2022) Researching of the structure and properties of FCAW hardfacing. based on Fe-Ti-Mo-B-C welded under low current. 1st Virtual International Conference "In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction" *Procedia Structural Integrity* 36 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.028>
5. Naik, H., Bhoskar, A., Kalyankar, V., Deshmukh, D. (2025) Nickel-based metallurgical coating architectures for superior wear resistance in high-temperature P91 steel applications. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems* Volume 9, March 2025, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2025.100151>
6. Correa, E.O., Alcântara, N.G., Valeriano, L.C., Barbedo, N.D., Chaves, R.R. (2015) The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process. *Surface and Coatings Technology* Volume 276, 25 August, Pages 479–484. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.026>
7. Zhang, J., Wei, J., Wei, S., Huang, Z., Xu, L., Wei, W., Gao, Z., Shi, Y. (2023) Effect of interlayer temperature and extremely low terminal cooling temperature on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing alloy. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 23, March–April, Pages 4105–4116. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.012>
8. Wu, J.Z., Zhang, S.H., Meng, X.P., Sun, R.H. and oth. (2026) Unraveling the high-temperature wear mechanisms of FeCoNiCrMo HEA claddings: the critical role of eutectic microstructure. *Wear*. Volume 593, 15 May, 206652. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2026.206652>
9. Monnet, A., Fras, T., Kazup, A., Bahi, S., Rusinek, A., Guitton, A. (2026) Multi-scale characterization of a high chromium-carbon based hardfacing alloy welded by flux-cored arc welding. *Materials Characterization*. Volume 233, March, 116038. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2026.116038>
10. Katsich, C., Rojacz, H., Hajas, B., Kirnbauer, A., Varga, M., Mayrhofer, P.H. (2026) Load-dependent mild abrasive wear behavior of Fe-Cr-C-based hardfacings at room and elevated temperatures. *Wear*. Available online 8 April, 206723 In Press, Journal Pre-proof. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2026.206723>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 04.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 621.793:666.76

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-10>

АНАЛІЗ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІКРОЧАСТИНОК ТРИОКСИДУ ВОЛЬФРАМУ WO_3 З ШАМОТНИМ ВОГНЕТРИВОМ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ УДАРІ

Топоров Андрій Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій та хімічного машинобудування
Державного вищого навчального закладу
«Донецький національний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0002-6365-9932

Алексєєва Ольга Євгенівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій та хімічного машинобудування
Державного вищого навчального закладу
«Донецький національний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0002-2768-6220

Попова Ольга Юріївна,

доктор економічних наук, доцент, проректор з наукової роботи,
професор кафедри економіки і управління
Державного вищого навчального закладу
«Донецький національний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0002-9093-5912

У роботі представлено комплексне теоретичне дослідження трибологічної взаємодії та контактної механіки при високошвидкісному ударі сферичної мікрочастинки триоксиду вольфраму (WO_3) діаметром 10 мкм об плоску підкладку з алюмосилікатного вогнетриву (шамоту) при швидкості зіткнення 200 м/с. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації процесів холодного газодинамічного напылення функціональних керамічних покриттів та прогнозування механізмів ерозійного зносу футерівки промислових агрегатів. Головною метою роботи є розрахунок максимальних контактних напружень, оцінка глибини інденування та прогнозування характеру руйнування матеріалів у локальній зоні контакту. Аналіз базується на модифікованій теорії Герца для динамічних процесів з урахуванням квазістатичного наближення, справедливого для дозвукових швидкостей удару відносно швидкості звуку в досліджуваних матеріалах. Дослідження включає детальний огляд фізико-механічних властивостей взаємодіючих тіл, розрахунок зведеного модуля пружності системи та визначення полів нормальних і дотичних напружень. Особливу увагу приділяється аналізу ймовірності переходу від пружної деформації до крихкого руйнування або пластичної течії з урахуванням масштабного ефекту міцності мікрочастинок. У роботі доведено, що, незважаючи на мікроскопічний масштаб події, виникаючі пікові контактні тиски (близько 7 ГПа) та радіальні розтягуючі напруження багаторазово перевищують межі міцності шамотної підкладки. Це переводить процес з області пружного зіткнення в режим інтенсивного ерозійного зносу, що супроводжується утворенням кільцевих тріщин (cone cracks) та локальним кратероутворенням. Отримані результати формують наукову базу для коригування технологічних режимів напылення та вибору стійкіших керамічних підкладок.

Ключові слова: контактна механіка, високошвидкісний удар, триоксид вольфраму, алюмосилікатний вогнетрив (або шамот), контактні напруження, теорія Герца, глибина інденування, крихке руйнування.

Toporov Andrii, Aleksieieva Olha, Popova Olha. Analysis of contact interaction between a tungsten trioxide (WO_3) microparticle and a fireclay refractory under high-velocity impact

This paper presents a comprehensive theoretical study of the tribological interaction and contact mechanics during the high-velocity impact of a spherical tungsten trioxide (WO_3) microparticle, 10 μm in diameter, on a flat aluminosilicate refractory (chamotte/fireclay) substrate at a collision velocity of 200 m/s. The relevance of the research is driven by the need to optimize the processes of cold gas-dynamic spraying of functional ceramic coatings and to predict the mechanisms of erosive wear in the linings of industrial units. The primary objective of this work is to calculate the maximum contact stresses, estimate the indentation depth, and predict the fracture behavior of the materials in the local contact zone. The analysis is based on the modified Hertz theory for dynamic processes, incorporating a quasi-static approximation that is valid for subsonic impact

velocities relative to the speed of sound in the investigated materials. The study includes a detailed review of the physical and mechanical properties of the interacting bodies, the calculation of the reduced elastic modulus of the system, and the determination of normal and shear stress fields. Particular attention is given to analyzing the probability of transition from elastic deformation to brittle fracture or plastic flow, taking into account the size effect on the strength of microparticles. The paper demonstrates that, despite the microscopic scale of the event, the resulting peak contact pressures (approximately 7 GPa) and radial tensile stresses significantly exceed the ultimate strength limits of the chamotte substrate. This shifts the process from an elastic collision regime to a state of intense erosive wear, accompanied by the formation of cone cracks and localized cratering. The obtained results provide a scientific basis for adjusting the technological parameters of spraying and selecting more resistant ceramic substrates.

Key words: contact mechanics, high-velocity impact, tungsten trioxide, aluminosilicate refractory (chamotte), contact stresses, Hertz theory, indentation depth, brittle fracture.

Вступ. Проблема взаємодії високошвидкісних мікрочастинок з керамічними перешкодами є фундаментальною задачею у низці критичних технологій. З одного боку, вона лежить в основі процесів газотермічного та холодного напилення функціональних покриттів, де кінетична енергія частинок використовується для їх адгезії та компактування. Триоксид вольфраму (WO_3), будучи важливим напівпровідниковим матеріалом, широко застосовується в електрохромних пристроях, газових сенсорах та фотокаталізі. Можливість формування шарів WO_3 методом прямого напилення на вогнетривкі підкладки вимагає точного розуміння вікна параметрів, за яких відбувається закріплення частинки, а не руйнування підкладки. З іншого боку, даний сценарій моделює умови ерозійного зносу футерівки промислових печей та реакторів. В умовах високотемпературних газових потоків частинки каталізаторів або продуктів реакції можуть бомбардувати стінки камери. Шамот, як найбільш поширений та економічний вогнетривкий матеріал, часто піддається подібним впливам. Розуміння напруженого стану при ударі дозволяє прогнозувати ресурс футерівки та механізми її деградації.

Дослідження кінетики удару керамічних частинок при холодному газодинамічному напиленні (ХГН) вимагає переосмислення класичних моделей, розроблених переважно для металевих систем. Фундаментальні механізми адгезії металів, що базуються на адіабатичній зсувній нестабільності (ASI), детально описані в роботах [2, с. 43; 7, с. 73]. Однак, як зазначається в [4, с. 50; 5, с. 293], ці моделі не можуть бути безпосередньо екстрапольовані на крихкі керамічні матеріали, такі як TiO_2 та WO_3 , через їх високу твердість та відсутність пластичності при кімнатних температурах.

Альтернативний механізм, відомий як Room Temperature Impact Consolidation (RTIC), був запропонований в [1, с. 18]. Цей підхід акцентує увагу на процесах фрагментації та подальшої консолідації нанорозмірних уламків. Чисельне

моделювання процесу руйнування керамічних мікрочастинок підтверджує важливість врахування масштабного ефекту та питомої енергії руйнування [3, с. 15]. Згідно з дослідженнями [6, с. 11], критична швидкість v_{crit} для кераміки визначається балансом між кінетичною енергією, роботою фрагментації та дисипативними втратами. Вплив властивостей підкладки на процес напилення, зокрема механічне анкерування в пористих структурах, розглядається в [8, с. 8; 9, с. 20]. Важливість оптимізації розміру частинок для досягнення необхідної енергії бондінгу підкреслюється в [10, с. 55]. Таким чином, комплексний аналіз кінетики удару керамічних частинок вимагає інтеграції енергетичних моделей руйнування та механіки контактної взаємодії.

1. Методи та методики дослідження

Розглядається нормальний удар (кут падіння 90°) сферичної частинки об плоску поверхню (рисунк 1).

Параметри задачі:

- **імпактор (частинка):** триоксид вольфраму wo_3 .
 - геометрія: сфера.
 - діаметр (d): 10 мкм (10×10^{-6} м).
 - швидкість (v_0): 200 м/с.
- **мішень (підкладка):** шамот (алюмосилікатна кераміка).
 - геометрія: пружний напівпростір (плоска поверхня).
- **цільові показники:**
 - максимальний контактний тиск (P_{max} або P_0).
 - розподіл головних напружень ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$).
 - максимальні дотичні напруження (τ_{max}), відповідальні за пластичність.
 - радіальні розтягуючі напруження, відповідальні за утворення кільцевих тріщин.

1.1. Методологія та обмеження

Як основний інструмент аналізу використовується теорія контактних напружень Генріха Герца. Застосування даної теорії до динамічного удару (квазістатичне наближення) є припустимим за умови виконання низки умов:

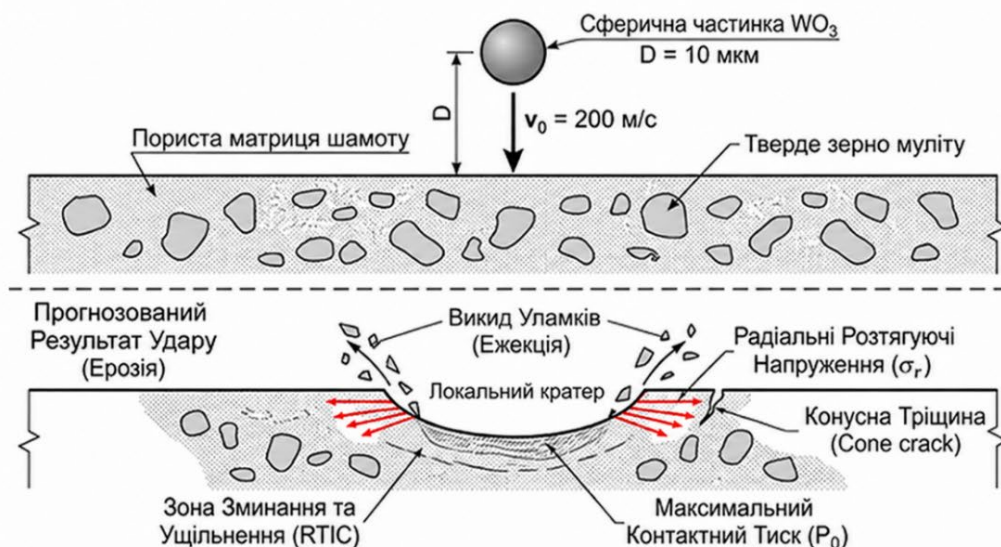


Рис. 1. Розрахункова схема

1. **Малість деформацій:** Радіус плями контакту a має бути малим порівняно з радіусом частинки R ($a \ll R$).

2. **Пружність:** Матеріали повинні підпорядковуватися закону Гука до моменту руйнування.

3. **Відсутність хвильових ефектів:** Швидкість удару має бути суттєво нижчою за швидкість поширення пружних хвиль у матеріалі ($v_0 \ll c_0$). Для кераміки швидкість звуку зазвичай становить 3000–8000 м/с, що робить швидкість 200 м/с допустимою для квазістатичного аналізу (менше 10% від c_0).

Однак, з огляду на високу швидкість та крихкість кераміки, звіт також включає аналіз виходу за межі пружності, оцінюючи ймовірність пластичної деформації та дроблення на основі критеріїв Мізеса та Ренкіна.

2. Фізико-механічні властивості матеріалів

Точність розрахунку напружень безпосередньо залежить від достовірності вхідних даних про властивості матеріалів. Керамічні матеріали, такі як WO_3 та шамот, характеризуються значним розкидом властивостей залежно від пористості, фазового складу та технології спікання. У цьому розділі проводиться критичний аналіз доступних дослідницьких даних для вибору найбільш репрезентативних значень («ефективних властивостей») для моделювання.

2.1. Триоксид вольфраму (WO_3)

Триоксид вольфраму являє собою поліморфний матеріал, кристалічна решітка якого зазнає спотворень типу перовскіту (ABO_3). При кімнатній температурі стабільною є моноклінна фаза ($\gamma-WO_3$), хоча залежно від умов синтезу

можуть бути присутні триклінні або гексагональні модифікації.

2.1.1. Густина

Теоретична густина кристалічного WO_3 розраховується на основі параметрів решітки. Дослідження методом DFT (теорія функціонала густини) та експериментальні дані вказують на значення в діапазоні 7.16–7.30 г/см³.

• **Обране значення:** Для консервативного розрахунку (максимізації кінетичної енергії) приймаємо густину щільної частинки: $\rho_1 = 7200 \text{ кг/м}^3$.

2.1.2. Пружні властивості

WO_3 є відносно жорстким оксидом.

• **Модуль Юнга (E):** Різні джерела наводять дані, отримані як експериментально (на тонких плівках і спечених зразках), так і теоретично (ab initio розрахунки).

– Розрахунки з перших принципів (DFT) для кубічної фази дають значення об'ємного модуля пружності (B) близько 205–228 ГПа та модуля зсуву (G) близько 123–153 ГПа.

– Використовуючи співвідношення для ізотропного наближення ($E = \frac{9BG}{3B+G}$), отримуємо діапазон значень $E \approx 300 \dots 350$ ГПа.

– Експериментальні дані для тонких плівок на ПАР-резонаторах іноді показують менші значення через мікроструктурні дефекти, проте для монокристалічної частинки слід орієнтуватися на верхні межі.

• **Коефіцієнт Пуассона (ν):** Значення варіюються у вузькому діапазоні 0.25–0.28.

• **Обрані значення:** $E_1 = 300 \text{ ГПа}$, $\nu_1 = 0.26$.

2.1.3. Міцнісні характеристики

Кераміка WO_3 є крихкою. Твердість за Вікерсом (HV) становить близько 15.3 ГПа (~1500

HV) для щільних зразків. Це важливий параметр для оцінки ймовірності руйнування самої частинки при ударі.

2.2. Шамот (Алюмосилікатний вогнетрив)

Шамот – це композиційний матеріал, який отримують шляхом випалу глини (каоліну) до втрати пластичності (утворення мулиту та кристобаліту), подальшого подрібнення та змішування зі сполучною глиною з повторним випалом. Його властивості критично залежать від співвідношення фаз (склофаза/муліт) та пористості.

2.2.1. Гетерогенність та вибір моделі

Структура шамоту складається з твердих зерен ("грогу"), занурених у більш м'яку та пористу матрицю.

- Зерна мулиту: $E \approx 150 \dots 220 \text{ ГПа}$.
- Пориста матриця: $E \approx 5 \dots 20 \text{ ГПа}$.

При ударі частинки розміром 10 мкм можливі два сценарії:

1. Удар об тверде зерно мулиту.
2. Удар об "ефективне середовище" (матрицю).

Для найбільш загального випадку (і враховуючи, що шамот частіше розглядається як макроскопічно однорідний матеріал в інженерних розрахунках футерівок) ми будемо використовувати властивості щільної шамотної цегли, але також проведемо аналіз чутливості.

2.2.2. Модуль Юнга (E)

Аналіз літератури показує широкий розкид:

- Пористі ізоляційні цегли: $E \approx 2 \dots 5 \text{ ГПа}$.
- Конструкційні щільні шамотні вироби (класу ША, ШБ): $E \approx 10 \dots 25 \text{ ГПа}$.
- Ультразвукові вимірювання динамічного модуля часто дають вищі значення, ніж статичні випробування.
- У дослідженнях геополімерів з наповнювачем із шамоту модуль Юнга досягає 17.7 ГПа при 50% наповненні.

• **Обране значення:** Для розрахунку максимальних напружень (найгірший сценарій для

частинки і найкращий для передачі енергії) доцільно вибрати вище значення, характерне для якісного щільного шамоту: $E_2 = 20 \text{ ГПа}$.

2.2.3. Коефіцієнт Пуассона (ν)

Для пористої кераміки та вогнетривів коефіцієнт Пуассона зазвичай низький. Експериментальні дані для шамотних цеглин вказують на діапазон 0.10–0.19.

- **Обране значення:** $\nu_2 = 0.15$.

2.2.4. Густина та міцність

- Густина: 1800–2300 кг/м³ (залежно від марки).

- Міцність на стиск: 20–60 МПа. Зверніть увагу на цей параметр: він на порядки нижчий за очікувані контактні напруження.

Всі визначені параметри розрахунків зведемо в таблицю 1.

3. Теоретичні основи розрахунку контактних напружень

Для визначення напружено-деформованого стану (НДС) у зоні контакту використовується класична теорія пружного удару Герца. Дана теорія дозволяє пов'язати кінетичну енергію налітаючої частинки з енергією пружної деформації матеріалів, визначаючи тим самим максимальну силу взаємодії та площу контакту.

3.1. Зведений модуль пружності (E^*)

Контактна жорсткість системи визначається комбінацією пружних властивостей обох тіл. Зведений модуль пружності E^* розраховується за формулою:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

Підставимо обрані значення:

- **внесок частинки (WO_3):**

$$\frac{1 - 0.26^2}{300 \times 10^9} \approx \frac{0.9324}{300} \text{ ГПа}^{-1} \approx 0.00311 \text{ ГПа}^{-1}$$

- **внесок підкладки (шамот):**

$$\frac{1 - 0.15^2}{20 \times 10^9} \approx \frac{0.9775}{20} \text{ ГПа}^{-1} \approx 0.04888 \text{ ГПа}^{-1}$$

Таблиця 1

Зведена таблиця параметрів для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця	Обґрунтування
Імпактор (WO_3)				
Діаметр	D	10×10^{-6}	м	запит користувача
Радіус	R_1	5×10^{-6}	м	геометрія
Швидкість	v_0	200	м/с	запит користувача
Густина	ρ_1	7200	кг/м ³	властивості матеріалу
Модуль Юнга	E_1	300	ГПа	властивості матеріалу
Коеф. Пуассона	ν_1	0.26	-	властивості матеріалу
Підкладка (Шамот)				
Радіус кривизни	R_2	∞	м	площина (напівпростір)
Модуль Юнга	E_2	20	ГПа	властивості матеріалу
Коеф. Пуассона	ν_2	0.15	-	властивості матеріалу

• **сумарна податливість:**

$$\frac{1}{E^*} \approx 0.00311 + 0.04888 = 0.05199 \text{ гПа}^{-1}$$

• **підсумковий зведений модуль:**

$$E^* = \frac{1}{0.05199} \text{ гПа} \approx 19.23 \text{ гПа}$$

Внесок шамоту в загальну податливість контакту становить близько 94% (0.04888/0.05199). Це означає, що жорсткість контакту і виникаючі напруження практично повністю визначаються властивостями м'якої підкладки. Частинка WO_3 у цій системі поводить себе практично як абсолютно твердий індентор.

3.2. Ефективна маса та енергія удару

Оскільки підкладка розглядається як нескінченний напівпростір, ефективна маса зіткнення дорівнює масі частинки m .

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_1$$

$$m = \frac{4}{3} \pi (5 \times 10^{-6})^3 (7200)$$

$$m \approx 1.333 \times 3.14159 \times 125 \times 10^{-18} \times 7200 \approx 3.77 \times 10^{-12} \text{ кг}$$

Кінетична енергія частинки перед ударом (W_k):

$$W_k = \frac{1}{2} m v_0^2$$

$$W_k = 0.5 \times (3.77 \times 10^{-12}) \times (200)^2$$

$$W_k = 0.5 \times 3.77 \times 10^{-12} \times 40000 = 7.54 \times 10^{-8} \text{ Дж}$$

3.3. Рівняння динамічного контакту

У момент максимального зближення частинок (швидкість дорівнює нулю) уся кінетична енергія переходить у потенційну енергію пружної деформації. Для контакту сфери та площини сила F пов'язана з глибиною впровадження δ законом:

$$F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta^{3/2}$$

Робота пружної деформації (інтеграл сили за переміщенням) дорівнює:

$$W_{el} = \int_0^{\delta_{max}} F d\delta = \int_0^{\delta_{max}} \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \delta^{3/2} d\delta = \frac{8}{15} E^* \sqrt{R} \delta_{max}^{5/2}$$

Прирівнюючи $W_k = W_{el}$, ми можемо знайти максимальну глибину впровадження δ_{max} .

4. Результати

4.1. Максимальна глибина впровадження

(δ_{max})

З рівняння енергетичного балансу виразимо δ_{max} :

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{8}{15} E^* \sqrt{R} \delta_{max}^{5/2}$$

$$\delta_{max} = \left(\frac{15 m v_0^2}{16 E^* \sqrt{R}} \right)^{2/5}$$

Підстановка числових значень:

$$\delta_{max} = \left(\frac{2.262 \times 10^{-6}}{6.88 \times 10^8} \right)^{0.4} = (3.288 \times 10^{-15})^{0.4}$$

$$\delta_{max} \approx 1.61 \times 10^{-6} \text{ м} = 1.61 \text{ мкм}$$

Глибина впровадження становить 1.61 мкм, що дорівнює близько 32% від радіуса частинки ($R=5$ мкм). Це значення знаходиться на межі застосовності класичної теорії Герца (зазвичай $\delta < 0.1R$), що вказує на значні геометричні нелінійності. Проте для оцінки порядку напружень це наближення залишається найбільш надійним аналітичним інструментом.

4.2. Радіус плями контакту (a)

У теорії Герца радіус контакту пов'язаний із глибиною впровадження:

$$a = \sqrt{R \delta_{max}}$$

$$a = \sqrt{5 \times 10^{-6} \times 1.61 \times 10^{-6}}$$

$$a = \sqrt{8.05 \times 10^{-12}}$$

$$a \approx 2.84 \times 10^{-6} \text{ м} = 2.84 \text{ мкм}$$

4.3. Максимальна сила удару (F_{max})

$$F_{max} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \rho_1^{3/2}$$

$$F_{max} = \left(\frac{4}{3} \times 19.23 \times 10^9 \right) \times (0.002236) \times (1.61 \times 10^{-6})^{1.5} \\ (1.61 \times 10^{-6})^{1.5} \approx 2.04 \times 10^{-9}$$

$$F_{max} \approx 57.34 \times 10^6 \times 2.04 \times 10^{-9} \approx 0.117 \text{ Н}$$

4.4. Максимальний контактний тиск (P_0)

Розподіл тиску по площадці контакту є напівеліптичним. Максимальний тиск P_0 досягається в центрі плями контакту ($r = 0$).

$$P_0 = \frac{3F_{max}}{2\pi a^2}$$

$$P_0 = \frac{3 \times 0.117}{2\pi (2.84 \times 10^{-6})^2}$$

$$P_0 = \frac{0.351}{2\pi \times 8.06 \times 10^{-12}}$$

$$P_0 = \frac{0.351}{50.64 \times 10^{-12}}$$

$$P_0 \approx 6.93 \times 10^9 \text{ Па}$$

$$P_{max} \approx 6.93 \text{ ГПа}$$

Для верифікації можна використати пряму аналітичну формулу залежності тиску від швидкості, що виключає проміжні обчислення глибини:

$$P_0 = \frac{2}{\pi} E^* \left(\frac{5 \rho_1 v_0^2}{4 E^*} \right)^{1/5}$$

Підстановка значень у цю формулу дає результат $P_0 \approx 7.01 \text{ ГПа}$, що підтверджує коректність проведених вище обчислень. Відмінність

менше 1.5% пояснюється похибками округлення.

5. Аналіз тензора напружень

Лише одне значення максимального тиску не дає повної картини потенційного руйнування. Необхідно проаналізувати компоненти напружень у глибині матеріалу (для оцінки пластичності) та на поверхні (для оцінки крихкого руйнування) (рисунок 2.).

5.1. Розподіл напружень по осі симетрії (вісь z)

Розглянемо напруження на різній глибині під центром контакту.

На поверхні ($z = 0$):

У центрі плями контакту матеріал перебуває у стані всебічного стиснення:

- вертикальне напруження: $\sigma_z = -P_0 \approx -7.0$ ГПа.
- радіальне та тангенціальне напруження:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -P_0 \frac{1+2\nu_2}{2}.$$

- для шамоту ($\nu_2 = 0.15$):

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -P_0(0.65) \approx -4.55 \text{ ГПа}.$$

Цей стан "гідростатичного" стиснення перешкоджає руйнуванню безпосередньо в точці контакту, дозволяючи матеріалу витримувати навантаження, що значно перевищують його межу міцності при однобічному стисненні.

Максимальні дотичні напруження ($\tau_{\max}$):

Згідно з критерієм Треска або Мізеса, пластична деформація починається, коли дотичні напруження досягають межі плинності зсуву. Максимум дотичних напружень знаходиться під поверхнею на глибині $z \approx 0.48a$ (для $\nu = 0.3$) або трохи глибше для $\nu = 0.15$.

$$\tau_{\max} \approx 0.31P_0$$

$$\tau_{\max} \approx 0.31 \times 7.0 \text{ ГПа} \approx 2.17 \text{ ГПа}$$

5.2. Розтягуючі напруження (Механізм кільцевих тріщин)

Найбільш небезпечними для крихких керамічних матеріалів, якими є WO_3 , і шамот, є розтягуючі напруження. Вони досягають максимуму на контурі плями контакту ($r=a$) на поверхні ($z=0$).

Формула для радіального напруження на межі контакту:

$$\sigma_{r(\max)} = \frac{1-2\nu}{3} P_0$$

Для підкладки з шамоту ($\nu_2 = 0.15$):

$$\sigma_{r(\max)} = \frac{1-0.30}{3} \times 7.0 = \frac{0.70}{3} \times 7.0 \approx 1.63 \text{ ГПа}$$

Таким чином радіальне напруження є розтягуючим (знак плюс), що провокує утворення кільцевих тріщин.

6. Характер руйнування

Отримані теоретичні значення напружень необхідно зіставити з реальними міцнісними характеристиками матеріалів, щоб визначити фізичну картину удару.

6.1. Порівняння з межею міцності шамоту

Шамот є пористим, крихким матеріалом.

- **Межа міцності на стиск (σ_{comp}):** Типові значення для якісного шамоту становлять 20–50 МПа (0.02...0.05 ГПа).

- **Межа міцності на розтяг (σ_{tens}):** Для кераміки зазвичай становить 1/10 від міцності на стиск, тобто близько 2–5 МПа.

- **Динамічна твердість (H_d):** Оцінюється як $H \approx 3\sigma_{\text{yield}}$. Навіть якщо прийняти оптимістичне значення межі плинності у 200 МПа (для зерен мулиту), твердість складе близько 0.6–1.0 ГПа.

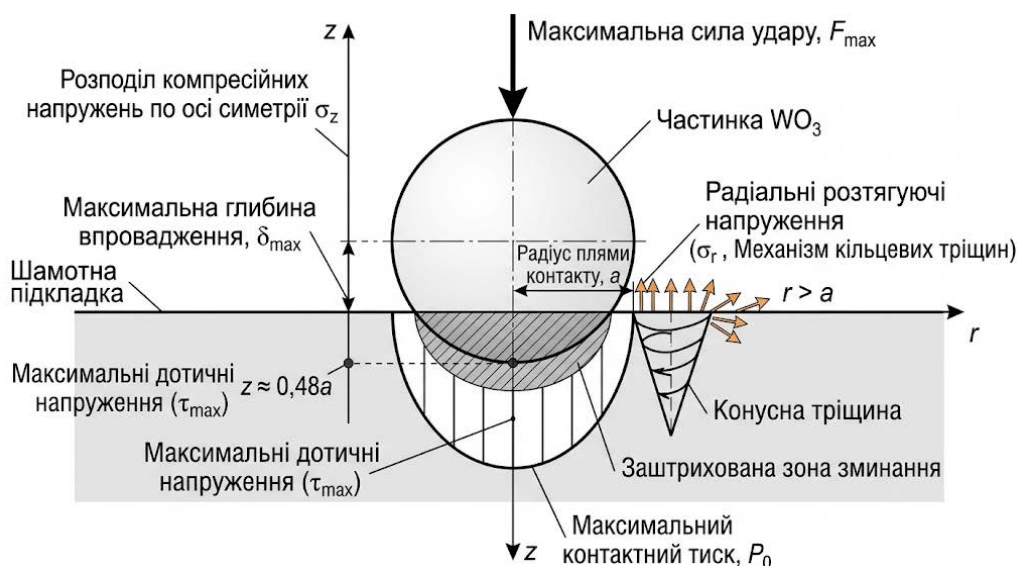


Рис. 2. Визначені параметри контактної взаємодії

Порівняння розрахункових та граничних напружень показує колосальне перевищення допустимих навантажень:

Тип напруження	Розрахункове значення (ГПа)	Межа міцності матеріалу (ГПа)	Коефіцієнт перевищення
Макс. тиск стиснення	7.0	~0.05 (макро), ~2.0 (мікро)	> 100x
Розтяг (поверхня)	1.63	~0.005	> 300x
Зсув (глибинний)	2.17	~0.2 (оцінка)	> 10x

Реалізація суто пружного удару (як передбачається в теорії Герца) **неможлива**.

1. Пластична течія та ущільнення: У зоні контакту відбудеться миттєве зминання пористої структури шамоту. Матеріал підкладки буде поводитися не як пружне тіло, а як пластичне або сипуче середовище.

2. Ерозія: Величезні розтягуючі напруження (1.63 ГПа) призведуть до миттєвого утворення мережі кільцевих тріщин і викришування матеріалу. Відбудеться утворення кратера.

3. Доля частинки (WO_3): Частинка WO_3 значно міцніша за шамот ($E = 300$ ГПа проти 20 ГПа), однак ударні навантаження у 7 ГПа можуть перевищити і її межу міцності (особливо враховуючи крихкість оксидів). Ймовірна

фрагментація частинки, але вона спрацює як "бронебійне осердя", проникаючи у м'яку мішень.

6.3. Аналіз впливу швидкості v_0 на контактні параметри

Проведемо аналіз впливу швидкості удару (в діапазоні 200–700 м/с) на основні показники контактної взаємодії.

Згідно з модифікованою теорією Герца, залежність параметрів удару від початкової швидкості v_0 є **нелінійною** (ступеневою). Це зумовлено тим, що кінетична енергія зростає квадратично (v^2), але контактна жорсткість (опір матеріалу) також зростає в міру збільшення площі контакту (глибини).

На рисунку 3 наведено залежності максимальної сили удару, максимального контактного тиску, максимальної глибини впровадження частинки, розтягуючих та дотичних напружень від швидкості частинки в діапазоні 200-700 м/с.

Максимальна глибина впровадження (δ_{max}) та радіус контакту (a)

– Глибина впровадження зростає пропорційно $v_0^{0.8}$ (майже лінійно). При збільшенні швидкості з 200 до 700 м/с (у 3.5 рази), глибина зростає з 1.61 мкм до 4.39 мкм.

– Важливо зазначити, що при $v_0 = 700$ м/с глибина (4.39 мкм) становить майже 88% від радіуса самої частинки (5 мкм). На таких

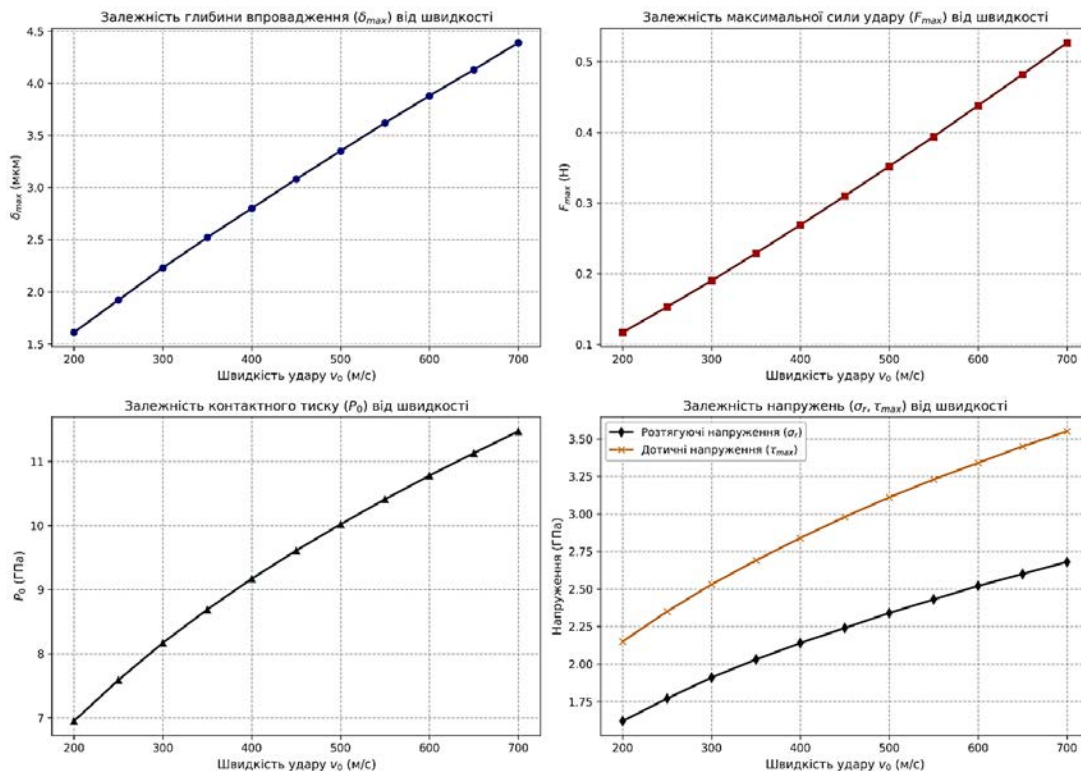


Рис. 3. Залежності основних параметрів контактної взаємодії від швидкості частинки

швидкостях частинка практично повністю занурюється у підкладку.

Максимальна сила удару (F_{max})

– Сила удару має найбільшу чутливість до зміни швидкості: $F_{max} \propto v_0^{1.2}$.

– У діапазоні від 200 до 700 м/с сила удару зростає з 0.117 Н до 0.527 Н (збільшення у 4.5 рази).

Максимальний контактний тиск (P_0)

– Контактний тиск зростає найповільніше: $P_0 \propto v_0^{0.4}$.

– Незважаючи на величезне зростання кінетичної енергії (у понад 12 разів), максимальний тиск зростає лише з ~6.9 ГПа до 11.47 ГПа (збільшення у 1.6 рази). Це пояснюється тим, що при ударі площа плями контакту (a^2) також збільшується, розподіляючи силу по більшій поверхні.

– Тим не менш, навіть тиск 6.9 ГПа вже у десятки разів перевищує межу міцності шамоту. Тиск 11.47 ГПа при 700 м/с гарантує миттєве перетворення матеріалу підкладки (і, найімовірніше, самої частинки WO_3) на дрібнодисперсний пил (тотальна фрагментація).

Розтягуючі та дотичні напруження (σ_r , τ_{max})

– Оскільки напруження прямо пропорційні контактному тиску (P_0), вони також підпорядковуються закону $v_0^{0.4}$.

– Радіальні розтягуючі напруження (σ_r), відповідальні за утворення поверхневих кільцевих тріщин (cone cracks), зростають з 1.62 ГПа до 2.68 ГПа. Оскільки межа міцності шамоту на розтяг становить лише кілька мегапаскалів (МПа), весь цей діапазон швидкостей лежить у зоні **сильного ерозійного зносу**.

Висновки. На підставі проведеного аналізу можна сформулювати такі висновки для прикладних задач:

1. **Ерозійний знос:** Удар частинок WO_3 (та аналогічних за густиною і твердістю) об шамотну футерівку при швидкостях ~200 м/с викликає інтенсивний ерозійний знос. Для захисту футерівки необхідно або знижувати швидкість потоку (нижче 50 м/с), або використовувати більш щільні, корундові або карбідокремнієві вогнетриви з модулем Юнга > 300 ГПа.

2. **Формування покриттів:** Якщо метою є осадження WO_3 на шамот (наприклад, методом холодного напилення), то режим 200 м/с є надлишковим для цілісної підкладки, але може бути ефективним механізмом закріплення за рахунок глибокого інденування ("анкерування"), якщо утворений кратер заповнюється фрагментами самої розбитої частинки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Akedo J. Aerosol deposition of ceramic thick films at room temperature: densification mechanism of ceramic layers. *Journal of the American Ceramic Society*. 2006. Vol. 89, № 6. P. 1834–1839. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2006.01030.x.
2. Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding in cold spraying. *Acta Materialia*. 2003. Vol. 51, № 15. P. 4379–4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X.
3. Chung H., Kim H. J., Lee C. H. Review of the fragmentation and consolidation of ceramic particles in cold spray. *Ceramics International*. 2021. Vol. 47, № 11. P. 15200–15215. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.02.162.
4. Kliemann J. O. Kinetisches Spritzen von Keramiksichten: Prozessverständnis und Schichteigenschaften: дис. ... д-ра інж. наук. Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2011. 145 с.
5. Kliemann J. O., Gärtner F., Klassen T., Kreye H. Formation of cold-sprayed ceramic layers on metal surfaces. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011. Vol. 20, № 1–2. P. 292–298. DOI: 10.1007/s11666-010-9562-4.
6. Papyrin Y., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A., Fomin V. Cold Spray Technology. Amsterdam: Elsevier, 2007. 336 p.
7. Schmidt T., Gärtner F., Assadi H., Kreye H. Development of a generalized parameter for cold spray deposition. *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54, № 3. P. 729–742. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.005.
8. Schmidt T., Gärtner F., Assadi H. Calculation of particle parameters for cold spraying of metal-ceramic mixtures. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009. Vol. 18, № 5–6. P. 887–896. DOI: 10.1007/s11666-009-9382-7.
9. Yin S., Jenkins R., Lupoi R., Bolot R., Liao H. Impact bonding in cold spraying: A review of the thermal-mechanical mechanisms. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2018. Vol. 43, № 3. P. 200–221. DOI: 10.1080/10408436.2017.1320803.
10. Wang Z., Mao P., Huang C., Yu P., Li W., Yin S. Deposition mechanism of ceramic reinforced metal matrix composites via cold spraying. *Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 85. P. 104167. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104167.

REFERENCES:

1. Akedo, J. (2006). Aerosol deposition of ceramic thick films at room temperature: densification mechanism of ceramic layers [Aerosol deposition of ceramic thick films at room temperature: densification mechanism of ceramic layers]. *Journal of the American Ceramic Society – Journal of the American Ceramic Society*, 89(6), 1834–1839. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01030.x>
2. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H. (2003). Bonding in cold spraying [Bonding in cold spraying]. *Acta Materialia – Acta Materialia*, 51(15), 4379–4394. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00274-X)
3. Chung, H., Kim, H. J., & Lee, C. H. (2021). Review of the fragmentation and consolidation of ceramic particles in cold spray [Review of the fragmentation and consolidation of ceramic particles in cold spray]. *Ceramics International – Ceramics International*, 47(11), 15200–15215. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.162>
4. Kliemann, J. O. (2011). *Kinetisches Spritzen von Keramiksichten: Prozessverständnis und Schichteigenschaften* [Kinetic spraying of ceramic layers: Process understanding and layer properties] (Doctoral dissertation). Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg
5. Kliemann, J. O., Gärtner, F., Klassen, T., & Kreye, H. (2011). Formation of cold-sprayed ceramic layers on metal surfaces [Formation of cold-sprayed ceramic layers on metal surfaces]. *Journal of Thermal Spray Technology – Journal of Thermal Spray Technology*, 20(1–2), 292–298. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9562-4>
6. Papyrin, Y., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., & Fomin, V. (2007). *Cold Spray Technology* [Cold Spray Technology]. Elsevier.
7. Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., & Kreye, H. (2006). Development of a generalized parameter for cold spray deposition [Development of a generalized parameter for cold spray deposition]. *Acta Materialia – Acta Materialia*, 54(3), 729–742. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.005>
8. Schmidt, T., Gärtner, F., & Assadi, H. (2009). Calculation of particle parameters for cold spraying of metal-ceramic mixtures [Calculation of particle parameters for cold spraying of metal-ceramic mixtures]. *Journal of Thermal Spray Technology – Journal of Thermal Spray Technology*, 18(5–6), 887–896. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9382-7>
9. Yin, S., Jenkins, R., Lupoi, R., Bolot, R., & Liao, H. (2018). Impact bonding in cold spraying: A review of the thermal-mechanical mechanisms [Impact bonding in cold spraying: A review of the thermal-mechanical mechanisms]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences – Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 43(3), 200–221. <https://doi.org/10.1080/10408436.2017.1320803>
10. Wang, Z., Mao, P., Huang, C., Yu, P., Li, W., & Yin, S. (2024). Deposition mechanism of ceramic reinforced metal matrix composites via cold spraying [Deposition mechanism of ceramic reinforced metal matrix composites via cold spraying]. *Additive Manufacturing – Additive Manufacturing*, 85, 104167. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104167>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 07.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 669.01:621.791.92:620.18:539.2

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-11>

CALPHAD-АНАЛІЗ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СПЛАВУ FeCoAlNiTa, ВИГОТОВЛЕНОГО МЕТОДОМ АВДЗ

Чжуньвень Цзі,

аспірант

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут»

ORCID ID: 0000-0001-7959-753X

Копилов В'ячеслав Іванович,

доктор технічних наук, професор

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут»

ORCID ID: 0000-0003-2811-0765

Завдовсєв Анатолій Вікторович,

кандидат технічних наук,

провідної науковий співробітник,

Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона

Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0001-7102-1544

Пашинська Олена Генріхівна,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,

професор кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-1789-3226

За допомогою програмного забезпечення Thermo-Calc (база даних TCHEA3) виконано CALPHAD-розрахунки для системи високоентропійного сплаву FeCoAlNiTa, виготовленого методом адитивного виробництва дуговим зварюванням (АВДЗ). Основна увага в роботі приділена термодинамічному опису систем, що дозволяє детально відстежити послідовність виділення фаз, зміну їхнього хімічного складу та температурні інтервали кристалізації. У статті проаналізовано вплив легуючих елементів на стабільність твердих розчинів та формування інтерметалідних сполук. Завдяки використанню сучасного програмного забезпечення та актуальних термодинамічних баз даних, робота ілюструє високу точність співпадіння розрахункових моделей із експериментальними даними мікроструктурного аналізу. Моделювання кристалізації за Шейлом–Гулливером показує, що збагачення танталу у залишковій рідкій фазі на завершальній стадії кристалізації сприяє евтектичному утворенню фази C14_Laves, у міждендритних областях. Результати моделювання узгоджуються з експериментально спостереженим розподілом збагаченої Ta- фази вздовж меж дендритних гілок. Рівноважні термодинамічні розрахунки (що відображають стан матеріалу при досягненні повної термодинамічної рівноваги) при температурі 1000 °C показують мольну частку фази Laves близько 2,1%. Це значно нижче за нерівноважний рівень, зафіксований у стані після наплавлення, що створює термодинамічну рушійну силу для часткового розчинення фази Лавеса при подальшій термічній обробці. Псевдобінарні перерізи показують, що збільшення вмісту Ta викликає стабілізацію C14_Laves, тоді як Al сильно сприяє утворенню впорядкованої фази BCC_B2. Отримані результати надають термодинамічну основу для розуміння фазового відбору під час кристалізації, оцінки умов термообробки та оптимізації складу цього сплаву. Результати CALPHAD-аналізу, наведені у статті, дозволяють не лише пояснити існуючі фазові перетворення, а й цілеспрямовано оптимізувати хімічний склад сплавів для досягнення заданих механічних та експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: CALPHAD; фазова рівновага; високоентропійний сплав; дугове адитивне виробництво; кристалізація за Шейлом; фаза Laves; фазова стабільність.

Junwen Ji, Kopylov Viacheslav, Zavadoveev Anatoliy, Pashinska Elena. Calphad analysis of the crystallization of the FeCoAlNiTa alloy produced by the WAAM method

CALPHAD calculations were performed using Thermo-Calc software (TCHEA3 database) for the FeCoAlNiTa high-entropy alloy system produced by wire arc additive manufacturing (WAAM). The primary focus of this work is

the thermodynamic description of the systems, allowing for a detailed tracking of the phase precipitation sequence, changes in their chemical composition, and solidification temperature ranges. The article analyzes the influence of alloying elements on the stability of solid solutions and the formation of intermetallic compounds. By utilizing modern software and up-to-date thermodynamic databases, the work illustrates a high degree of correlation between the computational models and experimental microstructural analysis data. Scheil–Gulliver solidification modeling demonstrates that tantalum enrichment in the residual liquid phase during the final stages of solidification promotes the eutectic formation of the C14_Laves phase in the interdendritic regions. The simulation results are consistent with the experimentally observed distribution of the Ta-enriched phase along the boundaries of dendritic branches. Equilibrium thermodynamic calculations (reflecting the state of the material upon reaching full thermodynamic equilibrium) at a temperature of 1000 °C show a molar fraction of the Laves phase of approximately 2.1%. This is significantly lower than the non-equilibrium level recorded in the as-deposited state, creating a thermodynamic driving force for the partial dissolution of the Laves phase during subsequent heat treatment. Pseudo-binary sections indicate that an increase in Ta content stabilizes the C14_Laves phase, while Al strongly promotes the formation of the ordered BCC_B2 phase. The obtained results provide a thermodynamic basis for understanding phase selection during solidification, evaluating heat treatment conditions, and optimizing the composition of this alloy. The CALPHAD analysis results presented in the article not only explain existing phase transformations but also enable the purposeful optimization of the chemical composition of alloys to achieve specified mechanical and operational characteristics.

Key words: CALPHAD, phase equilibrium, high-entropy alloy, wire arc additive manufacturing, Scheil crystallization, Laves phase, phase stability.

Вступ. Високоентропійні сплави (HEAs), що відрізняються багатокомпонентною структурою твердого розчину, демонструють високу твердість, зносостійкість та високотемпературну міцність, що робить їх перспективним напрямком у галузі конструкційних матеріалів [1; 2; 3; 4]. Дугове адитивне виробництво (WAAM) завдяки високій продуктивності та економічності вважається ефективним методом виготовлення великогабаритних компонентів з HEA [5; 6]. Автори [7, с. 1251–1252] за допомогою спеціально розробленого порошкового дроту (MPCW) виготовили методом WAAM евтектичний сплав FeCoAlNiTa. Структура після АВДЗ складається з матриці FCC та збагаченої танталом (Ta) фази C14_Laves вздовж междендритних гілок. Твердість становила близько 450 HV при дуже низькому видовженні; після витримки при 1000 °C на протязі 1 години та гартування у воді пластичність покращилася, а твердість зросла до близько 500 HV. Однак термодинамічні умови виділення C14_Laves під час кристалізації, рівноважні частки фаз та кількісний вплив компонентів на фазову стабільність залишалися невивченими.

Метод CALPHAD широко застосовується для оцінки фазової стабільності та проектування сплавів [8; 9; 10; 11] у поєднанні з термодинамічними базами даних для HEA (TCHEA). У цій роботі означений метод застосовано до системи FeCoAlNiTa для відповіді на три питання: за яких умов утворюється C14_Laves під час нерівноважної кристалізації; який рівноважний фазовий склад та рушійна сила розчинення C14_Laves при 1000°C; як зміни вмісту Ta та Al впливають на області стабільності фаз C14_Laves та BCC_B2.

Методика розрахунків. Термодинамічні розрахунки виконано за допомогою Thermo-Calc

2018a та бази даних TCHEA3 [8; 9]. У розрахунках активовано всі доступні фази бази даних без штучного виключення будь-яких фаз. Були виконані рівноважні розрахунки, які передбачають нескінченне час витримки, у якому система сягає мінімуму енергії Гіббса. На відміну від моделі Шейла вони описують стан матеріалу після тривалого відпалу. Обрано два склади, зразків отриманих АВДЗ (табл. 1). Склад А (Ta 4,29 ат.%) обрано з локальної області з підвищеною сегрегацією Ta для представлення характеристик міждендритної рідини; склад В (Ta 1,58 ат.%) наближений до макроскладу і більш придатний для оцінки фазової рівноваги при термообробці. Склад А імітує склад останніх порцій рідини, що кристалізується. Склад В – це середній склад сплаву, яким оцінюють поведінку матеріалу під час експлуатації чи відпалі. Виконано точкові рівноважні розрахунки для складу В у діапазоні 200–1400 °C з кроком 100 °C для вилучення рівноважних фазових часток.

Окрім того, розрахунки включають нерівноважну кристалізацію по моделі Шейла (без зворотної дифузії в твердій фазі) та псевдобінарні перерізи на основі складу А зі зміною мольної частки кожного елемента (решта нормалізується до 100 ат.%). У TCHEA3 фаза FCC описується моделлю FCC_L12, яка використовує єдину криву енергії Гіббса для невпорядкованої FCC_A1 та впорядкованої L12 структур [8, с. 355–360]. Фазові частки в табл. 2 наведено як мольні частки фаз (mole fraction of phases). Зазначимо, що у системі Fe–Co–Ni–Al–Ta для розглянутих складів формується багатофазна структура, що включає твердорозчинну фазу FCC (γ) та інтерметалідні фази BCC_B2 і C14_Laves. Основною фазою є FCC-твердий розчин, тоді як фази BCC_B2 та C14_Laves можуть бути

Таблиця 1

Розрахункові склади та експериментальні дані (ат.%)

Область / Склад	Fe	Co	Ni	Al	Ta
Склад А (розр.)	61.27	15.23	15.12	4.09	4.29
Склад В (розр.)	56.49	16.11	17.07	8.75	1.58
Макрообласть	57.22	16.08	16.97	8.48	1.25
Твердий розчин	56.14	16.18	17.65	9.22	0.80
Ta-rich Laves	37.53	9.55	9.84	2.98	40.09

присутні у вигляді другої та третьої фаз залежно від складу та температури. Таким чином, характерною є реалізація трифазної системи FCC + BCC_B2 + C14_Laves із домінуванням FCC-матриці.

3. Результати та дискусія.

3.1 Шлях кристалізації за Шейлом–Гуллівером

Моделювання кристалізації виконано за схемою Шейла–Гуллівера, яка передбачає відсутність дифузії в твердій фазі та повне перемішування рідкої фази. У цих припущеннях склад залишкової рідини еволюціонує в процесі затвердіння, що дозволяє описати послідовність утворення фаз і розвиток мікросегрегації при нерівноважній кристалізації. Аналіз показує, що для складу А (Таблиця 1) ліквідус знаходиться близько 1410 °С, первинна фаза – FCC_L12. Через обмежену розчинність у FCC матриці Ta витісняється в залишкову рідину. При частці твердої фази розплаву ~75% запускається евтектична реакція Liquid + FCC_L12 + C14_Laves, кристалізація завершується при ~1275 °С, інтервал кристалізації $\Delta T \approx 135$ °С.

У табл. 1 вміст Ta у зоні твердого розчину становить лише 0,80 ат.%, тоді як у фазі Laves сягає 40,09 ат.% – ця різниця майже на два порядки не узгоджується з прогнозованою моделлю Шейла

накопичувальною сегрегацією Ta. Фаза Laves утворюється лише після досягнення частки твердої фази розплаву >75%, що відповідає експериментальним спостереженням розподілу фази Laves вздовж меж дендритних гілок [7, с. 1253–1256]. Слід зазначити, що модель Шейла нехтує зворотною дифузією в твердій фазі і може переоцінювати сегрегацію в умовах АВДЗ.

Для складу В ліквідус дорівнює ~1407 °С, первинна фаза FCC_L12. На відміну від складу А, при частці твердої фази розплаву $\geq 80\%$ спочатку з'являється BCC_B2, а C14_Laves лише при частці твердої фази розплаву >90%. BCC_B2 присутній у дуже малій кількості; його утворення в умовах АВДЗ потребує підтвердження іншими методами дослідження. Але це непроста задача, так як електронна мікроскопія в режимі обернено-розсіяних електронів (Back-Scattered Electrons) може дати помилку, так як Ta важчий за інші елементи, тому фаза Лавеса виглядає світлою на знімках. При виконанні рентгеноструктурного аналізу (X-Ray Diffraction) фаза B2 не була виявлена, можливо, через її малу кількість (нижче порога чутливості методу в 3–5%).

3.2 Рівноважні фазові частки та термодинамічний аналіз термообробки при 1000 °С

Табл. 2 містить рівноважні мольні частки фаз для складу В у діапазоні 800–1400 °С. Аналіз

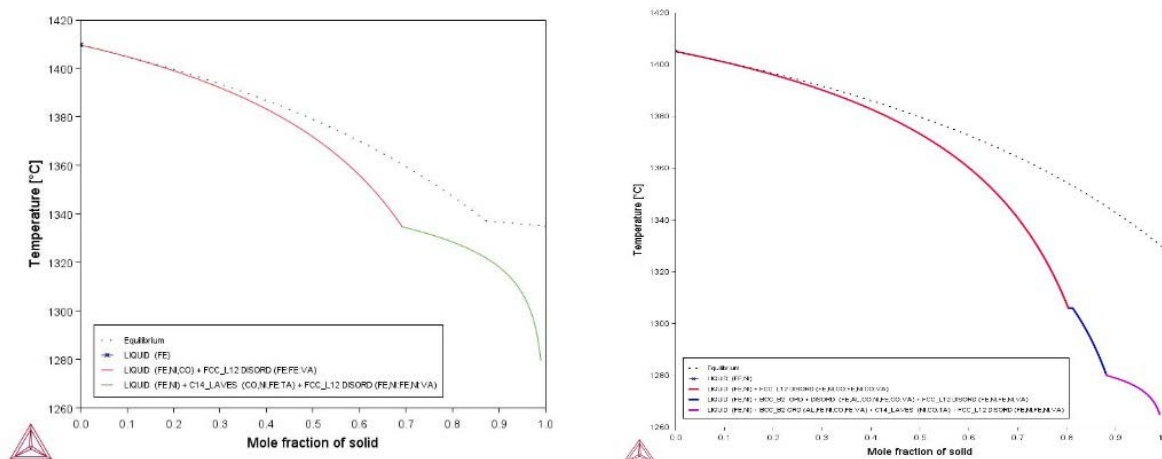


Рис. 1. Шляхи кристалізації за Шейлом–Гуллівером: (а) склад А; (б) склад В

даних показує, що при 1200 °C і вище реалізується однофазний стан FCC_L12. Нижче 1100 °C з'являються BCC_B2 та C14_Laves. FCC зменшується від 92,8% (1100 °C) до 66,3% (800 °C), BCC_B2 зростає від 7% до 29%, C14_Laves – від 0,3% до 4,7%.

При термообробці за температури 1000 °C на протязі 1 години при подальшому гартуванні [7, с. 1256–1258] рівноважна мольна частка C14_Laves ~2,1%. У стані після АВДЗ Laves утворюється нерівноважно і її кількість значно перевищує рівноважну, створюючи рушійну силу для розчинення. Спостережене зниження зв'язності другої фази узгоджується з цим прогнозом. Вивільнений Ta може змінити стан матриці FCC, однак зв'язок зі зміною твердості (450 → 500 HV) потребує підтвердження додатковими дослідженнями. Варто додати, що зростання твердості з 450 до 500 HV після відпалу (попри часткове розчинення зміцнюючої фази Лавеса) може бути пов'язане з виділенням нанорозмірних включень фази B2, яку передбачає розрахунок (14%), але яка не видно на звичайному XRD.

Наші розрахунки прогнозують ~14% BCC_B2 при 1000 °C, однак у [7, с. 1256–1258] цю фазу не виявлено з допомогою рентгенівської

дифракції. Розбіжність може бути пов'язана з кінетичними обмеженнями, відхиленнями складу тощо. Для вирішення питання треба проводити додаткові дослідження. З термодинамічної точки зору, 1000 °C відповідає діапазону, де є рушійна сила для часткового розчинення Laves, але однофазна область FCC ще не досягнута. Чи є ця температура оптимальною – потребує подальшої оцінки.

3.3 Псевдобінарні перерізи та композиційна чутливість

На основі складу А розраховано псевдобінарні перерізи зі зміною мольної частки кожного елемента та нормалізацією решти. Вплив Ta на стабільність C14_Laves показано на рис. 2. При низькому вмісті Ta Laves присутня лише при низьких температурах; зі зростанням Ta область стабільності розширюється. При поточному складі (Ta ≈ 4,29 ат.%) Laves співіснує з FCC у діапазоні 750–900 °C. Збільшення Ta розширює область C14_Laves; надмірний Ta може збільшити ризик окрихчення металу.

Збільшення вмісту Al сприяє стабілізації впорядкованої фази BCC_B2 (рис. 3). При концентрації Al нижче ~6 ат.% фаза B2 реалізується лише в області низьких температур, тоді як зі зростанням вмісту Al її область стабільності

Таблиця 2

Рівноважні мольні частки фаз для складу В (800–1400 °C)

T (°C)	FCC_L12	BCC_B2	C14_Laves	Liquid
1400	0.120	—	—	0.880
1300	1.000	—	—	—
1200	1.000	—	—	—
1100	0.928	0.069	0.003	—
1000	0.839	0.140	0.021	—
900	0.751	0.213	0.036	—
800	0.663	0.290	0.047	—

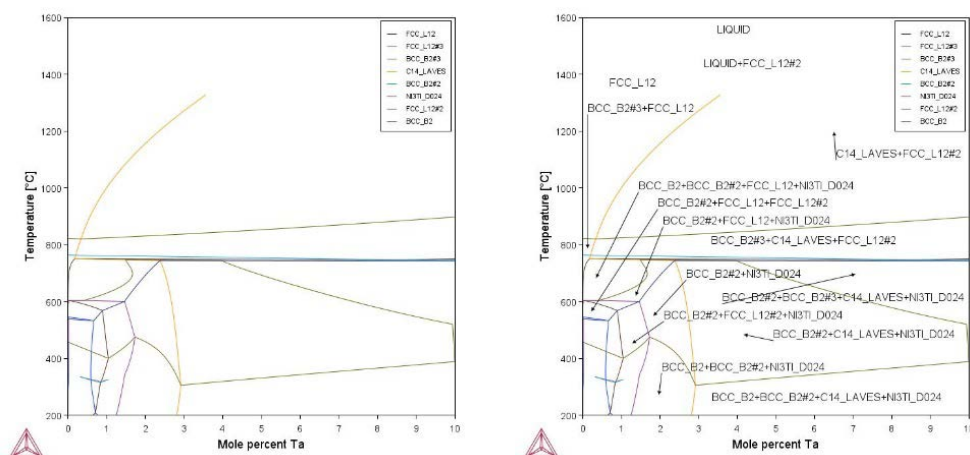


Рис. 2. Псевдобінарні перерізи зі зміною вмісту Ta (ліворуч: частки фаз–температура; праворуч: фазові області)

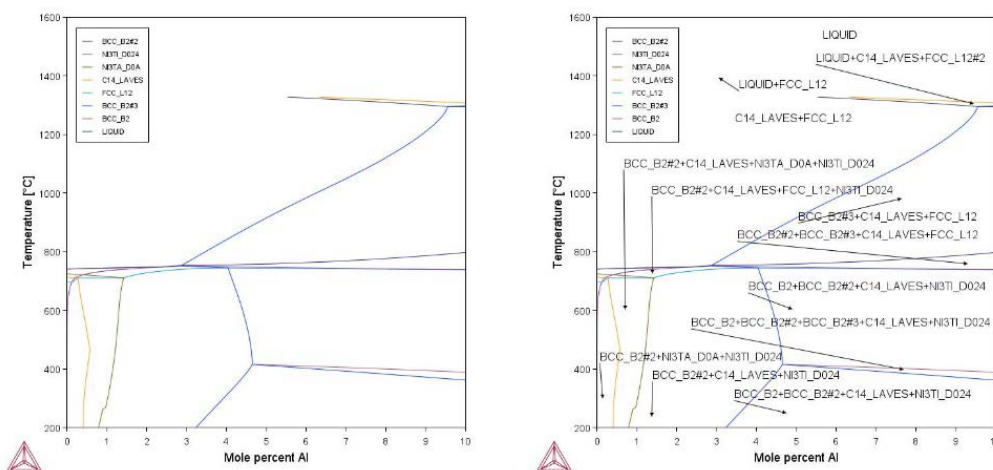


Рис. 3. Псевдобінарні перерізи зі зміною вмісту Al

істотно розширюється. Склад В (Al 8,75 ат.%) знаходиться в області фазової конкуренції між FCC та BCC_B2. Таким чином, вміст Al необхідно контролювати для збереження стабільності FCC-матриці, оскільки його підвищення призводить до зростання частки BCC_B2 та відповідного зниження частки FCC-фази.

Висновки

1. Встановлено, що розрахунки CALPHAD для системи високоентропійного сплаву FeCoAlNiTa мають обмеження. По-перше, моделювання кристалізації за схемою Шейла–Гулівера нехтує зворотньою дифузією, можливо переоцінюючи сегрегацію. По-друге, рівноважні розрахунки не включають кінетику, тому прогнозовані частки BCC_B2 – термодинамічні тенденції. Окрім того, BCC_B2 при 1000 °C ще не підтверджена експериментально. Таким чином, на наш погляд результати розрахунків можуть

слугувати термодинамічною основою для інтерпретації мікроструктури, а не бути повним описом шляху перетворень.

2. Моделювання по Шейлу–Гуліверу показує: спочатку формується FCC, потім збагачення Ta в залишковій рідині сприяє утворенню евтектики C14_Laves. Цей результат узгоджується з експериментально спостереженим розподілом збагаченої Ta другої фази у міждендритних областях.

3. При 1000 °C мольна частка C14_Laves значно нижча за нерівноважний рівень, надаючи термодинамічне обґрунтування часткового розчинення фази Laves. Розрахунки показали, що тантал Ta є найефективнішим елементом для стабілізації C14_Laves, а алюміній Al сильно розширює область стабільності BCC_B2, що надає орієнтири для коригування складу сплавів FeCoAlNiTa при АВДЗ.

ЛІТЕРАТУРА:

- George E. P., Raabe D., Ritchie R. O. et al. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*. 2019. Vol. 4. P. 515–534. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>.
- Ai C., Wang G., Liu L. et al. Effect of Ta addition on solidification characteristics of CoCrFeNiTa eutectic high entropy alloys. *Intermetallics*. 2020. Vol. 120. Art. 106769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106769>.
- Zhang Y., Chen X., Jayalakshmi S. et al. Factors determining solid solution phase formation and stability in CoCrFeNiX_{0.4} (X= Al, Nb, Ta) high entropy alloys fabricated by powder plasma arc additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 857. Art. 157625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157625>.
- Fujieda T., Shiratori H., Kuwabara K. et al. CoCrFeNiTi-based high-entropy alloy with superior tensile strength and corrosion resistance achieved by a combination of additive manufacturing using selective electron beam melting and solution treatment. *Materials Letters*. 2017. Vol. 189. P. 148–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.054>.
- Pan Z., Ding D., Wu B. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. Springer, 2018. P. 3–24. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-8330-3_1

6. Shen Q., Kong X., Chen X. Fabrication of bulk Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy using combined cable wire arc additive manufacturing (CCW-AAM): Microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. Vol. 74. P. 136–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.09.034>
7. Zavdoveev A., Baudin T., Brisset F. et al. High hardness Ta doped eutectic high entropy alloy by wire arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol. 138. P. 1251–1258. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15384-3>
8. Mao H., Chen H.-L., Chen Q. TCHEA1: A Thermodynamic Database Not Limited for “High Entropy” Alloys. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2017. Vol. 38. P. 353–368. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11669-017-0542-z>
9. Chen H.-L., Mao H., Chen Q. Database development and Calphad calculations for high entropy alloys: Challenges, strategies, and tips. *Materials Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 210. P. 279–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.07.082>
10. Mao H., Selleby M. Evaluation of Calphad Approach and Empirical Rules on the Phase Stability of Multi-principal Element Alloys. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2017. Vol. 38. P. 382–396. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11669-017-0543-y>
11. Wang X., Liu W., Huang C. et al. Effective design of Cr-Co-Ni-Ta eutectic medium entropy alloys with high compressive properties using combined CALPHAD and experimental approaches. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 13. Art. 6102. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11136102>
12. Zavdoveev A., Klapatyuk A., Baudin T. et al. Non-equi-molar Cantor high entropy alloy fabrication using metal powder cored wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing Letters*. 2023. Vol. 5. Art. 100124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100124>
13. Zavdoveev A., Kim H. S., Heo Y.-U. et al. Microstructure and properties of HEA fabricated through metal powder wire arc additive manufacturing. *Materials Letters*. 2024. Vol. 357. Art. 135726. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135726>
14. Keil B., Golisch M., Witusiewicz V. T. et al. Phase equilibria in the Al–Co–Cr–Fe–Ni high entropy alloy system: thermodynamic description and experimental study. *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. Art. 270. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00270>
15. Zhang F., Zhang C., Chen S. L. et al. An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations. *Calphad*. 2014. Vol. 45. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2013.10.006>

REFERENCES:

1. George, E. P., Raabe, D., & Ritchie, R. O. (2019). High-entropy alloys [High-entropy alloys]. *Nature Reviews Materials – Nature Reviews Materials*, 4, 515–534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>
2. Ai, C., Wang, G., Liu, L., et al. (2020). Effect of Ta addition on solidification characteristics of CoCrFeNiTa eutectic high entropy alloys [Effect of Ta addition on solidification characteristics of CoCrFeNiTa eutectic high entropy alloys]. *Intermetallics – Intermetallics*, 120, 106769. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106769>
3. Zhang, Y., Chen, X., Jayalakshmi, S., et al. (2021). Factors determining solid solution phase formation and stability in CoCrFeNiX_{0.4} (X= Al, Nb, Ta) high entropy alloys fabricated by powder plasma arc additive manufacturing [Factors determining solid solution phase formation and stability in CoCrFeNiX_{0.4} (X= Al, Nb, Ta) high entropy alloys fabricated by powder plasma arc additive manufacturing]. *Journal of Alloys and Compounds – Journal of Alloys and Compounds*, 857, 157625. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157625>
4. Fujieda, T., Shiratori, H., Kuwabara, K., et al. (2017). CoCrFeNiTi-based high-entropy alloy with superior tensile strength and corrosion resistance achieved by a combination of additive manufacturing using selective electron beam melting and solution treatment [CoCrFeNiTi-based high-entropy alloy with superior tensile strength and corrosion resistance achieved by a combination of additive manufacturing using selective electron beam melting and solution treatment]. *Materials Letters – Materials Letters*, 189, 148–151. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.054>
5. Pan, Z., Ding, D., Wu, B., et al. (2018). Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review [Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review]. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing – Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 3–24. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8330-3_1
6. Shen, Q., Kong, X., & Chen, X. (2021). Fabrication of bulk Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy using combined cable wire arc additive manufacturing (CCW-AAM): Microstructure and mechanical properties [Fabrication of bulk Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy using combined cable wire arc additive manufacturing (CCW-AAM): Microstructure and mechanical properties]. *Journal of Materials Science & Technology – Journal of Materials Science & Technology*, 74, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.09.034>

7. Zavdoveev, A., Baudin, T., Brisset, F., et al. (2025). High hardness Ta doped eutectic high entropy alloy by wire arc additive manufacturing [High hardness Ta doped eutectic high entropy alloy by wire arc additive manufacturing]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology – The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 138, 1251–1258. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15384-3>
8. Mao, H., Chen, H.-L., & Chen, Q. (2017). TCHEA1: A Thermodynamic Database Not Limited for “High Entropy” Alloys [TCHEA1: A Thermodynamic Database Not Limited for “High Entropy” Alloys]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion – Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 38, 353–368. <https://doi.org/10.1007/s11669-017-0542-z>
9. Chen, H.-L., Mao, H., & Chen, Q. (2018). Database development and Calphad calculations for high entropy alloys: Challenges, strategies, and tips [Database development and Calphad calculations for high entropy alloys: Challenges, strategies, and tips]. *Materials Chemistry and Physics – Materials Chemistry and Physics*, 210, 279–290. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.07.082>
10. Mao, H., & Selleby, M. (2017). Evaluation of Calphad Approach and Empirical Rules on the Phase Stability of Multi-principal Element Alloys [Evaluation of Calphad Approach and Empirical Rules on the Phase Stability of Multi-principal Element Alloys]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion – Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 38, 382–396. <https://doi.org/10.1007/s11669-017-0543-y>
11. Wang, X., Liu, W., Huang, C., et al. (2021). Effective design of Cr-Co-Ni-Ta eutectic medium entropy alloys with high compressive properties using combined CALPHAD and experimental approaches [Effective design of Cr-Co-Ni-Ta eutectic medium entropy alloys with high compressive properties using combined CALPHAD and experimental approaches]. *Applied Sciences – Applied Sciences*, 11(13), 6102. <https://doi.org/10.3390/app11136102>
12. Zavdoveev, A., Klapatyuk, A., Baudin, T., et al. (2023). Non-equi-molar Cantor high entropy alloy fabrication using metal powder cored wire arc additive manufacturing [Non-equi-molar Cantor high entropy alloy fabrication using metal powder cored wire arc additive manufacturing]. *Additive Manufacturing Letters – Additive Manufacturing Letters*, 5, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100124>
13. Zavdoveev, A., Kim, H. S., Heo, Y.-U., et al. (2024). Microstructure and properties of HEA fabricated through metal powder wire arc additive manufacturing [Microstructure and properties of HEA fabricated through metal powder wire arc additive manufacturing]. *Materials Letters – Materials Letters*, 357, 135726. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135726>
14. Keil, B., Golisch, M., Witusiewicz, V. T., et al. (2020). Phase equilibria in the Al–Co–Cr–Fe–Ni high entropy alloy system: thermodynamic description and experimental study [Phase equilibria in the Al–Co–Cr–Fe–Ni high entropy alloy system: thermodynamic description and experimental study]. *Frontiers in Materials – Frontiers in Materials*, 7, 270. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00270>
15. Zhang, F., Zhang, C., Chen, S. L., et al. (2014). An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations [An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations]. *Calphad – Calphad*, 45, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2013.10.006>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 06.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.74.04:620.9:519.876:658.51

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-12>

ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ШЛЯХОМ ПЕРЕХОДУ НА ХОЛОДНОТВЕРДІЮЧІ СУМІШІ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ТА РЕГРЕСІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ

Бушуй Наталя Миколаївна,

магістрантка кафедри металургії та інноваційних технологій

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0000-3827-8110

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук, професор,

проректор з науково-дослідної роботи,

професор кафедри металургії та інноваційних технологій

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

У статті досліджено перехід ливарного цеху з традиційних піщано-глинистих сумішей (ПГС) на холоднотвердіючі системи (ХТС) на основі фуранових смол у межах проєкту модернізації виробництва. Метою роботи є наукове та техніко-екологічне обґрунтування доцільності такого переходу з урахуванням енергоефективності, міцності форм і екологічних обмежень. У дослідженні використано методи лабораторних випробувань і кореляційно-регресійного аналізу для оцінки впливу технологічних параметрів на властивості сумішей. Встановлено, що традиційна технологія ПГС характеризується критичною енергоемністю: для досягнення залишкової вологості 0–0,02 % необхідне термічне сушіння при температурі 350–400 °C протягом 600–670 хв, причому підвищення температури не забезпечує статистично значущого прискорення процесу. На відміну від цього, у ХТС процес твердіння відбувається за температури навколишнього середовища без використання природного газу, що змінює енергетичний баланс виробництва. Показано, що досягнення міцності форм на рівні 3,0–5,0 МПа забезпечується дозуванням смоли в межах 0,8–1,2%, тоді як збільшення частки каталізатора не впливає на міцність і є технологічно необґрунтованим. Також підтверджено можливість використання до 50 % регенованого піску без зниження міцності. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні переходу до енергонезалежного ливарного виробництва за рахунок повного усунення стадії сушіння (відмови від газових сушильних печей) та зниження енерговитрат, за умови забезпечення екологічної безпеки шляхом впровадження систем локальної аспірації.

Ключові слова: ливарне виробництво, холоднотвердіючі суміші, фуранова смола, енергоефективність, No-Bake, регресійний аналіз, міцність форм, регенерація піску, екологічна безпека.

Bushui Nataliia, Kukhar Volodymyr. Justification of the project for modernization of foundry production by transition to cold-hardening mixtures based on energy intensity analysis and regression modeling of the moulding process

The paper investigates the transition of a foundry shop from traditional green sand (clay-bonded) mixtures to cold-hardening systems (No-Bake) based on furan resins within the framework of production modernization. The aim of the study is to provide scientific and techno-ecological justification for such a transition, taking into account energy efficiency, mould strength, and environmental constraints. The study applies laboratory testing methods and correlation-regression analysis to evaluate the influence of technological parameters on the properties of moulding mixtures. It is established that the traditional green sand technology is characterized by critical energy intensity: to achieve a residual moisture content of 0–0.02%, thermal drying at 350–400 °C for 600–670 minutes is required, while increasing temperature does not provide a statistically significant acceleration of the process. In contrast, in cold-hardening systems the hardening process occurs at ambient temperature without the use of natural gas, which fundamentally changes the energy balance of production. It is shown that achieving mould strength at the level of 3.0–5.0 MPa is ensured by controlling the resin content within 0.8–1.2%, whereas increasing the catalyst proportion does not affect strength and is technologically unjustified. The possibility of using up to 50 % reclaimed sand without reducing mould strength is also confirmed. The practical significance of the study lies in substantiating the transition to energy-independent foundry production by completely eliminating the drying stage (abandoning gas-fired drying furnaces) and reducing energy consumption, provided that environmental safety is ensured through the implementation of local exhaust ventilation systems.

Key words: foundry production, cold-hardening mixtures, furan resin, energy efficiency, No-Bake, regression analysis, mould strength, sand reclamation, environmental safety

Вступ. У машинобудівних ливарних цехах та ремонтних цехах металургійних підприємств на етапі виготовлення литих заготовок піщані технології формоутворення залишаються домінуючими для виготовлення ливарних форм і стрижнів. За даними досліджень D. A. Mhamane, понад 70 % усіх виливків виготовляють із використанням піщаних форм [1]. Проте технологія формування піщано-глинистих сумішей (ПГС) має обмеження з точки зору енергоефективності. Зростаючі вимоги до розмірної точності литва та глобальний тренд на зниження енергоємності виробництва зумовлюють поступову відмову від традиційних методів формоутворення на користь сучасних технологій хімічного твердіння (No-Bake).

На ТОВ «Метінвест Машинері», філіал №1, експлуатуються піщано-глинисті суміші з вмістом глини 9,0–12,0%. Глиниста складова зумовлює поглинання вологи на рівні 4,0–8,0%, що, у свою чергу, потребує її інтенсивного видалення шляхом термічного сушіння. У результаті технологічний цикл стає критично залежним від використання газових сушильних установок, які забезпечують видалення вологи та формування початкової міцності форм. Термічна обробка супроводжується значними витратами природного газу, тоді як досягнута міцність на стиск залишається низькою – на рівні 0,5–0,8 кг/см². Така міцність є недостатньою для забезпечення стійкості форм до гідродинамічного впливу розплаву, що призводить до їх руйнування під час заливки. Як наслідок, зростає рівень браку литва та знижується конкурентоспроможність виробництва. Висока енергоємність процесу та його залежність від природного газу не відповідають сучасним вимогам до ефективності та модернізації ливарного виробництва.

Перехід від ПГС до синтетичних зв'язувальних є стратегічним напрямом розвитку ливарного виробництва. Як зазначають у своїх працях Р. В. Лютий та співавтори [2], серед розмаїття органічних систем для відповідального сталевих та чавунних литва пріоритетним є використання фуранових смол, проте головною умовою їх безпечного використання є суворий контроль хімічного складу: вміст вільного азоту в полімері має бути суворо < 0,5%, для запобігання утворенню азотної пористості у металі. Також впровадження фуранових No-Bake систем вимагає прецизійного контролю кінетики твердіння. У фундаментальному дослідженні S. G. Acharya та співавторів [3] за допомогою статистичного методу дисперсійного аналізу (ANOVA) було кількісно доведено ієрархію впливу технологічних параметрів на

механічну стабільність форми. Температура піску (42 % впливу): Оптимальне вікно – 24–30 °С. Відхилення нижче 22 °С розцінюється як втрата контролю над процесом. Вміст смоли (35 % впливу). Решта 23 % розподіляється між часткою кислотного каталізатора (який впливає переважно на швидкість твердіння, а не на фінальну міцність) та статистичною похибкою. Оптимальна міцність, необхідна для запобігання дефекту «піщана раковина», формується на 4-й годині після замішування [3]. Що стосується газопроникності, то у ХТС цей показник сягає 150 од., завдяки цьому всі гази легко виходять крізь пори піщаної форми назовні, не потрапляючи в метал, що гарантує відсутність у литві газових раковин.

Проте існуюча наукова база має сліпі зони. S. G. Acharya тестував у лабораторії з ідеальним піском і дуже малою кількістю смоли (0,7–0,85%) [3]. Але на реальному заводі це не працює. Морфологія наповнювача диктує інші закони. Досягнення цільової газопроникності 150 од. вимагає підвищення концентрації зв'язувального до 0,8–1,2%. Відхилення можуть залишати зерна піску непокритими або формувати надлишок смоли. Згідно з дослідженнями St. M. Dobosz [4], перевищення концентрації зв'язувального понад 1,2 % призводить до закупорки міжзернового простору піщаної матриці. Це не лише блокує вихід газів (знижує газопроникність), а й, за даними M. Holtzer [5], критично підвищує газотворну здатність суміші, що є головною причиною утворення газових раковин у литві.

Проблема полягає в тому, що сліпе копіювання технології часто ігнорує кислотоємність піску (показник Acid Demand Value, ADV). Він показує кількість лужних домішок (карбонатів) у кварці. Для фуранової ХТС це критичний параметр: оскільки смола твердіє від кислотного каталізатора, пісок із високим ADV просто нейтралізує цю кислоту. Наповнювач з ADV > 6 мл миттєво нейтралізує сульфокислотний каталізатор. Суміш не твердіє. Спроба технологів компенсувати це надлишковим каталізатором (понад 50 % від маси смоли) провокує масове виділення діоксиду сірки (SO₂) та катастрофічну крихкість форми. Прецизійне хімічне дозування – єдиний інструмент стабілізації процесу. Це доводить, що не можна «лікувати» поганий пісок зайвою хімією. Єдиний шлях – це надточне дозування, де враховується кожен грам смоли та кожен мілілітр каталізатора залежно від якості піску.

Разом з цим, впровадження ХТС генерує нові екологічні виклики. Згідно з аналітикою

M. Holtzer [5], замкнений цикл використання піску (регенерація 85–92 %) призводить до системного закиснення матриці. Показник рН фільтратів знижується до 3,1, що інтенсифікує вимивання важких металів (Cr, Cu, Ni). Більш того, термічна деструкція полімеру (при 1300–1500 °C) під час заливки металу в форму з регенератором провокує триразове зростання емісії канцерогенного бензолу порівняно зі свіжим піском [4]. Загальнообмінна вентиляція просто розсіює токсини по всій робочій зоні, отруюючи персонал. Парадигма «міцність ціною екології» є тупиковою. Рішення вимагає інженерної реакції. Підприємство зобов'язано змонтувати локальну аспірацію прямої дії безпосередньо над змішувачами. Витяжка має жорстко синхронізуватися з 10-секундним циклом замісу, перехоплюючи пари формальдегіду та фурфуролового спирту в першу секунду емісії. Лабораторні дослідження St. M. Dobosz вказують на майбутню перспективу використання біорозкладних полімерів, типу PCL (Polycaprolactone). St. M. Dobosz пропонує вводити PCL як екомодифікатор до складу ХТС. Часткова заміна фуранової смоли на 10 % полікапролактону дозволяє суттєво знизити емісію канцерогенних газів групи BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes), зокрема бензолу, під час заливки металу, оскільки PCL при термічній деструкції розпадається на безпечні CO₂ та воду, при цьому критично не знижуючи міцність форми [4], проте сьогодні базовим інструментом екологічної безпеки залишається потужна просторова фільтрація. Синергія жорстких хімічних пропорцій та потужної локальної аспірації гарантує повну енергонезалежність цеху [6].

Поглиблений аналіз показує, що формування дефектів у литві при використанні фуранових холоднотвердіючих сумішей має не лінійний, а багатофакторний характер, де ключову роль відіграє взаємодія між складом зв'язувального, структурою піщаної матриці та умовами термічної деструкції. Як узагальнює J. Campbell [7], газові дефекти виливків є наслідком не стільки абсолютної кількості газу, скільки порушення балансу між швидкістю його утворення та можливістю евакуації через порову структуру форми, що безпосередньо пов'язано з морфологією піску та властивостями зв'язувального. Параметри суміші слід розглядати у взаємозв'язку, а не ізольовано.

Як показано у роботах S. G. Acharya та співавторів [8, 9], властивості фуранових холоднотвердіючих сумішей і процеси газоутворення визначаються сукупною дією взаємопов'язаних факторів, зокрема вмісту зв'язувального,

каталізатора, гранулометричного складу наповнювача та умов твердіння, причому їх вплив має нелінійний характер. Встановлено, що інтенсивність газовиділення та склад газової фази залежать як від кількості смоли, так і від умов її термічної деструкції, що безпосередньо впливає на ймовірність утворення газових дефектів у литві [9]. Водночас результати моделювання, отримані G. R. Chate та ін. [10], підтверджують, що досягнення оптимальних властивостей формувальних сумішей можливе лише за умови застосування методів планування експерименту (Design of Experiments, DOE) та регресійного аналізу, які дозволяють врахувати міжфакторні взаємодії. Таким чином, сучасні підходи орієнтовані на розгляд холоднотвердіючих сумішей як керованої багатофакторної системи, що підлягає цілеспрямованій оптимізації, а не емпіричному підбору складу.

Сучасні дослідження показують, що ефективність застосування холоднотвердіючих сумішей на основі фуранових смол визначається складною нелінійною взаємодією технологічних, фізико-хімічних та екологічних факторів. Ключову роль відіграють не лише параметри складу (вміст зв'язувального та каталізатора), а й властивості піску, зокрема його кислотемність, морфологія та ступінь регенерації, а також кінетика твердіння і газоутворення. При цьому традиційний підхід, заснований на емпіричному підборі складу, не забезпечує необхідної стабільності процесу в промислових умовах. У зв'язку з цим перехід від піщано-глинистих сумішей до ХТС доцільно розглядати як формування керованої багатофакторної технологічної системи, що потребує інтегрованого підходу до оптимізації параметрів, використання методів статистичного аналізу та забезпечення екологічної безпеки виробництва.

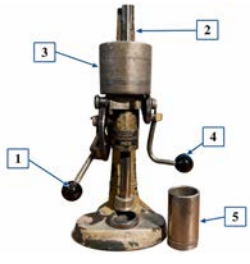
Метою роботи є обґрунтування доцільності переходу ливарної ділянки на фуранові холоднотвердіючі суміші на основі аналізу енергоефективності та екологічних обмежень процесу. Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом застосування лабораторних досліджень, планування експерименту та регресійного аналізу для встановлення кількісних закономірностей впливу складу сумішей і технологічних параметрів формування на їх властивості.

Об'єктом дослідження є процес формоутворення ливарних форм із використанням піщано-глинистих і холоднотвердіючих сумішей.

Предметом дослідження є закономірності впливу складу сумішей (вміст зв'язувального, каталізатора, характеристики піску) та

Таблиця 1

Технічні характеристики копра лабораторного 2М030

Копер лабораторний 2М030	
Призначення: Виготовлення стандартних зразків із заданою щільністю	
Параметр	Значення
Основні вузли	Станина (1), напрямний шток (2), ударний вантаж/бойок (3), механізм підйому (4), гільза для формування зразка (5)
Привід	Механічний, кулачковий
Тип зразка	Циліндричний Ø50×50 мм
Формування зразка	У гільзі
Кількість ударів	3
Маса бойка	~7 кг
Висота падіння	~50 мм
Повторюваність	За рахунок сталої енергії удару

Таблиця 2

Технічні характеристики приладу для визначення газопроникності (модель 042)

Прилад для визначення газопроникності 042	
Призначення: Вимірювання здатності сирової форми пропускати повітря/гази	
Параметр	Значення
Основні вузли	корпус (1), шкала манометра (2), бокова шкала (3), камера зразка (4), кран повітря (5), форма (6)
Метод вимірювання	Пропуск повітря через зразок
Тип манометра	Водяний
Джерело тиску	Вага колокола та вантажів
Регулювання тиску	Додавання/зняття вантажів
Режими роботи	Відкрито / закрито / випробування
Габарити	372 × 255 × 460 мм
Маса	15,4 кг

Механічні властивості формувальних сумішей, зокрема границю міцності на стиск, визначали на випробувальній машині моделі 04116А (табл. 4).

технологічних параметрів формування на енергоефективність процесу, міцність і газопроникність форм, а також рівень шкідливих викидів у ливарному виробництві.

Методи та методики дослідження. Для розв'язання поставленої проблеми та обґрунтування доцільності переходу на нову технологію було застосовано комплексний підхід, що поєднує лабораторні методи дослідження, планування експерименту та регресійний аналіз експериментальних даних.

Обладнання, прилади та методологія експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження виконували на базі сертифікованої ливарної лабораторії із застосуванням комплексу спеціалізованого обладнання, що забезпечує відтворюваність результатів та контроль основних фізико-механічних характеристик формувальних сумішей. До складу експериментального комплексу входили: лабораторний копер, прилад для визначення газопроникності, прилад для визначення вологості, випробувальна машина для визначення міцності та аналітичні ваги. Ключові параметри роботи основного обладнання наведено в табл. 1–5.

Для забезпечення однакової щільності та геометрії дослідних зразків використовували лабораторний копер моделі 2М030 (табл. 1). Ущільнення формувальної суміші здійснювали шляхом багаторазового ударного навантаження внаслідок падіння бойка з фіксованої висоти. Формування виконували в стандартній гільзі, що забезпечувало стабільність геометричних параметрів зразків. Кінематична схема копра (кулачковий механізм) гарантує сталу енергію удару, що є критичним для відтворюваності результатів ущільнення.

Газопроникність формувальних сумішей визначали на приладі моделі 042 (табл. 2), принцип дії якого базується на пропусканні повітря через зразок за фіксованого перепаду тиску. Тиск створювали вагою колокола та додатковими вантажами, а його контроль здійснювали за допомогою водяного манометра. Така схема забезпечує стабільні умови вимірювання та можливість регулювання режимів роботи.

Вологість формувальних матеріалів визначали гравіметричним методом із використанням приладу для прискореного визначення вологості моделі 062М (табл. 3). Сушіння зразків здійснювали інфрачервоним випромінюванням, при цьому тривалість процесу контролювали реле часу, а обертання столика забезпечувало рівномірний прогрів. Це забезпечує стабільні значення початкової та залишкової вологості.

Навантаження прикладали до зразка з регульованою швидкістю до моменту руйнування. Формування навантаження здійснювали пневматичним приводом, а результати вимірювань фіксували за допомогою цифрової індикації. Конструкція машини забезпечує автоматичне розвантаження після досягнення граничного значення, що виключає вплив оператора на результат.

Таблиця 3

Технічні характеристики приладу для визначення вологості 062M

Прилад для визначення вологості 062M	
Призначення: Експрес-визначення початкової вологості суміші	
Параметр	Значення
Основні вузли	верхня кришка (1), кожух нагрівального блока (2), фіксувально-регулювальний вузол (3), стіл (4), чашка для зразка (5), реле часу (6)
Метод визначення	Гравіметричний
Тип нагріву	Інфрачервоний
Потужність лампи	500 Вт
Напруга живлення	220 В
Тип реле часу	16-1 РВМ
Час сушіння	До 6 хв
Електродвигун	Двигун синхронний дискретний ДСД-2
Частота обертання	≈ 2 об/хв

Контроль маси на всіх етапах експерименту здійснювали за допомогою аналітичних ваг Axis AD500 (табл. 5), що забезпечують високу точність відважування наважок і зразків.

Таким чином, використане обладнання забезпечує: стандартизоване формування зразків; контроль вологості та структури суміші; відтворюваність умов вимірювання газопроникності; достовірне визначення механічних характеристик; мінімізацію впливу оператора на результати експерименту. Експериментальні дослідження проводили серіями з варіюванням складу суміші та режимів обробки. Для кожного режиму забезпечували однакові умови формування зразків, вимірювання властивостей та контролю параметрів, що дозволило отримати відтворювані дані, придатні для подальшого регресійного аналізу.

Таблиця 4

Технічні характеристики випробувальної машини 04116A

Випробувальна машина моделі 04116A	
Призначення: Визначення границі міцності сирого зразка на стиск	
Параметр	Значення
Основні вузли	Блок індикації (1), навантажувальний гвинтовий механізм (2), опорна платформа (3), корпус (4)
Метод випробування	Статичний стиск
Діапазон вимірювання	60–300 кПа
Зусилля	117,8–588 Н
Швидкість навантаження	2–15 кПа/с
Похибка	±2,0 %
Повторюваність	≤ 2 %
Привід	Пневматичний
Індикація	Цифрова
Напруга живлення	220 В
Частота	50 Гц
Потужність	≤ 150 ВА
Габарити	400 × 340 × 550 мм
Маса	≤ 27 кг

Таблиця 5

Технічні характеристики електронних ваг Axis AD500

Ваги електронні аналітичні, Модель Axis AD500	
Призначення: Точне зважування наважок та контроль маси зразків	
Параметр	Значення
Межі зважування	0,02–500 г
Дискретність	0,001 г
Клас точності	III (за ДСТУ EN 45501:2017)
Час стабілізації	≤ 3 с
Калібрування	Зовнішнє
Живлення	220 В

Методика планування експерименту та регресійного аналізу. Для встановлення кількісних залежностей між параметрами процесу та властивостями формувальних сумішей застосовано підхід планування експерименту

з подальшим регресійним аналізом. З урахуванням різних механізмів формування властивостей дослідження виконували окремо для ПГС та ХТС.

Для ПГС досліджували процес термічного видалення вологи. Як фактори варіювали температуру та тривалість сушіння в межах фактичних режимів роботи обладнання. Параметром відгуку приймали залишкову вологість після сушіння. Для ХТС досліджували вплив складу суміші на формування міцності. Варіювали вміст фуранової смоли, частку кислотного каталізатора та кількість регенованого піску в технологічно допустимих межах. Параметром відгуку приймали границю міцності на стиск через фіксований час після формування.

Експерименти виконували за факторними планами з можливістю оцінки впливу параметрів та їх взаємодії. Для кожної комбінації факторів забезпечували однакові умови формування та випробування зразків. Отримані експериментальні дані обробляли із застосуванням Microsoft Excel (пакет «Аналіз даних»), який використовували для побудови регресійних моделей і визначення їх коефіцієнтів. На основі результатів формували аналітичні залежності та виконували їх аналіз для встановлення впливу факторів на властивості сумішей. Це дозволило визначити раціональні області зміни параметрів для забезпечення заданих властивостей формувальних сумішей.

Методика передбачала зіставлення отриманих залежностей і впливу факторів для ПГС та ХТС, що дозволило порівняти технології з урахуванням різної природи процесів.

Результати та дискусії. Тут наведено результати технологічного аудиту формувального процесу, експериментальних досліджень і їх регресійного аналізу, що дозволяють

кількісно оцінити ефективність сушіння ПГС та обґрунтувати параметри формування фуранових ХТС.

Результати експериментальних досліджень ПГС та ХТС і їх аналіз. Для обґрунтування напрямку модернізації проведено технологічний аудит існуючого процесу на ТОВ «Метінвест Машинері». Базові фізико-механічні параметри традиційної ПГС, що експлуатується на підприємстві, наведено у першому технічному паспорті (табл. 6).

Таблиця 6

**Технічний паспорт ПГС
(формувальна та стрижнева суміші)**

Параметр	Стрижнева суміш	Формувальна суміш
Газопроникність, од.	100 – 160	80 – 120
Міцність на стиск, кг/см ² (КПа)	0,6 – 0,8	0,5 – 0,7
Вологість, %	5,0 – 8,0	4,0 – 7,0
Вміст глини, %	9,0 – 12,0	9,0 – 12,0

Як видно з табл. 6, ПГС характеризується низькою міцністю на стиск (0,5–0,8 кг/см²), що не забезпечує достатньої стійкості форми до гідродинамічних навантажень розплаву. Водночас підвищена вологість (4–8%) зумовлює необхідність застосування тривалого термічного сушіння.

Для кількісної оцінки ефективності процесу сушіння виконано Експеримент №1 із застосуванням багатофакторного регресійного аналізу. У межах дослідження проаналізовано вплив параметрів стану суміші (вологість X_1 , міцність X_2 , газопроникність X_3) та режимних факторів (температура сушіння $X_4 = 350$ – 400 °С, час сушіння $X_5 = 600$ – 670 хв) на залишкову вологість (Y_1). Фрагмент матриці вхідних даних наведено у табл. 7.

Таблиця 7

Фактори впливу на залишкову вологість ПГС, матриця планування експерименту та результати вимірювання міцності ПГС (Експеримент №1)

Вологість суміші, X_1 , %	Міцність суміші, X_2 , КПа	Газопроникність, X_3 , од.	Температура сушки, X_4 , °С	Час сушки, X_5 , хв	Кількість залишкової вологи, Y_1 , %
6,1	0,79	130	355	630	0,01
7,2	0,8	110	350	620	0,00
6,8	0,77	120	400	670	0,00
6,5	0,67	125	380	610	0,02
7,3	0,63	140	360	620	0,00
6,5	0,78	115	350	630	0,02
6,6	0,72	130	400	600	0,01
7,1	0,65	115	380	670	0,00
7,7	0,79	100	370	600	0,00
6,4	0,8	100	350	670	0,01

Отримана математична модель описується наступним рівнянням регресії ($R^2 = 0,84$):

$$Y_1 = 0,351 - 0,018 \cdot X_1 - 0,065 \cdot X_2 - 0,003 \cdot X_3 - 3,77 \cdot 10^{-5} \cdot X_4 - 0,0002 \cdot X_5. \quad (1)$$

Значення коефіцієнта детермінації свідчить про задовільну адекватність моделі в межах дослідженого діапазону. Аналіз коефіцієнтів регресії показує, що зниження залишкової вологості визначається переважно тривалістю сушіння (X_5), тоді як вплив температури (X_4) є незначним. Це узгоджується з результатами аналізу значущості факторів, згідно з якими підвищення температури в межах 350–400 °C не супроводжується статистично відчутним прискоренням процесу видалення води.

Досягнення рівня залишкової вологості 0–0,02% забезпечується при тривалості сушіння 600–670 хв, що відповідає 10–11 годинам безперервної роботи сушильного обладнання. Таким чином, інтенсифікація процесу за рахунок підвищення температури є неефективною, а сам процес має виражений енергоємний характер.

Як вже зазначалось вище, альтернативою традиційній ПГС є використання процесів хімічного твердіння. Проектні параметри фуранової ХТС та відповідний технологічний ефект наведено у іншому технічному паспорті (табл. 8).

Як видно з табл. 8, застосування фуранових ХТС забезпечує формування структури без стадії термічного сушіння (вологість < 0,2%), що виключає необхідність використання сушильного обладнання. При цьому досягається

суттєве підвищення міцності (3,0–5,0 МПа) при збереженні достатньої газопроникності, що сприяє підвищенню стабільності форм і зниженню дефектності виливків.

Для визначення впливу складу суміші на міцність реалізовано Експеримент №2 із застосуванням факторного планування та подальшого регресійного аналізу. Досліджувався вплив трьох параметрів: вмісту смоли ($X_1 = 0,8$ – $1,2\%$), каталізатора ($X_2 = 30$ – 50%) та частки регенерату ($X_3 = 0$ – 50%). Результати наведено у табл. 9.

Отримана математична модель описується наступним рівнянням регресії ($R^2 = 0,735$):

$$Y_2 = 1,375 + 2,5 \cdot X_1 - 1,079 \cdot 10^{-17} \cdot X_2 - 0,003 \cdot X_3. \quad (2)$$

Значення R^2 свідчить про прийнятну узгодженість моделі з експериментальними даними. Коефіцієнти рівняння вказують на визначальний вплив вмісту фуранової смоли (X_1) на міцність, для якого підтверджено статистичну значущість ($P = 0,029$), де P – р-значення, що використовується для оцінки статистичної значущості коефіцієнтів регресії і характеризує ймовірність отримання спостережуваного ефекту за відсутності реального впливу фактора. Натомість збільшення дози кислотного каталізатора з 30% до 50% не має абсолютно ніякого впливу на міцність, а тільки труїть цех діоксидами сірки. Це свідчить про недоцільність перевищення оптимального вмісту кислотного каталізатора, оскільки його збільшення не супроводжується підвищенням міцності та призводить до зайвих матеріальних витрат.

Таблиця 8

Проектний паспорт фуранової ХТС

Фізико-механічні властивості, од. вим.	Проектне значення	Технологічний ефект модернізації
Вологість, %	< 0,2	Енергонезалежність: Повна відмова від газових сушильних печей.
Газопроникність, од.	150	Якість: Безперешкодний вихід газів деструкції смоли.
Границя міцності на стиск, МПа	3,0 – 5,0	Стабільність: Ліквідація піщаних включень та деформацій.
Газотворна здатність, см ³ /г	8 – 11	Зниження ризику газової пористості у 2,5 раза.
Точність розмірів, мм	0,3 – 0,5	Можливість отримання виливків чистових розмірів.
Рівень регенерації піску, %	85 – 92	Зменшення витрат на закупівлю свіжого піску на 90%.

Таблиця 9

Матриця планування експерименту та результати вимірювання міцності ХТС (Експеримент №2)

Смола, X_1 , %	Каталізатор, X_2 , %	Регенерат, X_3 , %	Міцність через 4 год, Y_2 , МПа
0,8	30	0	3,20
1,2	30	0	4,80
0,8	50	0	3,00
1,2	50	0	4,50
0,8	30	50	3,40
1,2	30	50	3,80
0,8	50	50	3,60
1,2	50	50	4,10

Крім того, результати регресійного аналізу вказують на можливість використання у складі суміші до 50% регенованого піску без суттєвого зниження міцності, що створює передумови для зменшення витрат на виробництво (потребує додаткової експериментальної перевірки).

Порівняльний аналіз енергоємності процесів формування при використанні ПГС та ХТС. Порівняльний аналіз енергоємності процесів формування (табл. 10) демонструє принципову відмінність між традиційною технологією піщано-глинистих сумішей та холоднотвердіючими системами. Для досягнення залишкової вологості на рівні 0–0,02% у ПГС необхідне термічне сушіння при температурі 350–400 °С протягом 600–670 хв (10–11 год), що супроводжується безперервним спалюванням природного газу. При цьому підвищення температури сушіння не забезпечує суттєвого скорочення тривалості процесу, що свідчить про його низьку енергетичну ефективність.

На відміну від цього, у технології холоднотвердіючих сумішей стадія термічного сушіння повністю відсутня, оскільки формування міцності відбувається за рахунок хімічної полімеризації зв'язувального при температурі навколишнього середовища. Це дозволяє усунути найбільш енергоємну операцію процесу та скоротити тривалість формування більш ніж на 10 годин для кожної партії форм.

Нормована оцінка енерговитрат показує, що перехід на ХТС забезпечує їх зниження до рівня 0,05–0,10 від базового значення для ПГС, що відповідає скороченню загального енергоспоживання на 90–95%. При цьому в обох технологіях зберігаються енерговитрати на приготування та змішування сумішей, однак у випадку ПГС їх внесок є незначним порівняно з енерговитратами на сушіння (<10%), тоді як у технології ХТС саме змішування та дозування

компонентів формують основну частку залишкових енерговитрат.

Таким чином, перехід на холоднотвердіючі суміші забезпечує не лише скорочення тривалості виробничого циклу, але й радикальне зниження енергоємності процесу формування за рахунок повного усунення стадії термічного сушіння.

Висновки. Проведений регресійний аналіз процесу сушіння піщано-глинистих сумішей ($R^2 = 0,84$) показав, що досягнення залишкової вологості на рівні 0–0,02% забезпечується переважно тривалістю сушіння (600–670 хв), тоді як підвищення температури в межах 350–400 °С не приводить до статистично значущого прискорення процесу. Це свідчить про дифузійно обмежений характер видалення вологи та високу енергоємність технології ПГС.

Порівняльний аналіз енергоємності процесів формування показав, що використання ХТС дозволяє повністю виключити стадію термічного сушіння та скоротити тривалість технологічного циклу більш ніж на 10 годин. Нормована оцінка енерговитрат свідчить про їх зниження до рівня 0,05–0,10 від базового значення для ПГС, що відповідає скороченню енергоспоживання на 90–95%.

За результатами регресійного аналізу властивостей ХТС ($R^2 = 0,735$) встановлено, що визначальним фактором формування міцності є вміст фуранової смоли (0,8–1,2%), для якого підтверджено статистичну значущість ($P = 0,029$). У зазначеному діапазоні забезпечується досягнення міцності форм на рівні 3,0–4,8 МПа, що відповідає вимогам до стабільності форми при заливці металу.

Вплив кислотного каталізатора в межах 30–50% від маси смоли не є статистично значущим щодо міцності, що свідчить про відсутність ефекту від його підвищених дозувань.

Таблиця 10

Порівняння енергоємності процесів формування при використанні ПГС та ХТС

Параметр	ПГС	ХТС / No-Bake
Температура основного процесу	350–400 °С	20–30 °С
Тривалість енергоємної стадії	600–670 хв (10–11 год)	відсутня
Тип процесу твердіння	термічне сушіння	хімічне твердіння
Джерело основних енерговитрат	спалювання природного газу	електроспоживання (змішування)
Основна енергоємна операція	сушіння форм	змішування та дозування компонентів
Питома роль змішування в енергобалансі	незначна (<10%)	визначальна (до 100 % залишкових витрат)
Відносний рівень енерговитрат (ПГС = 1,0)*	1,0	0,05–0,10
Оцінка зниження енерговитрат	–	на 90–95 %

Примітка: * – значення відносного рівня енерговитрат наведено у нормованих одиницях (ПГС = 1,0) на основі виключення стадії термічного сушіння як домінуючої складової енерговитрат процесу.

Перевищення оптимального вмісту каталізатора призводить до необґрунтованого зростання матеріальних витрат та підвищення рівня шкідливих викидів без покращення механічних характеристик суміші.

Введення до 50% регенованого піску не супроводжується суттєвим зниженням міцності форм у межах дослідженого діапазону параметрів, що створює передумови для зменшення витрат на сировину. Водночас використання регенерату пов'язане з екологічними

обмеженнями, зокрема закисленням піщаної матриці та зростанням емісії токсичних продуктів термічної деструкції, що потребує врахування при впровадженні технології.

Сукупність отриманих результатів підтверджує доцільність переходу від ПГС до фуранових холоднотвердіючих сумішей як до керованої багатофакторної технологічної системи, оптимізація якої повинна базуватися на поєднанні регресійного аналізу, контролю складу суміші та забезпечення екологічної безпеки виробництва.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Mhamane D. A., Rayjadhav S. B., Shinde V. D. Analysis of chemically bonded sand used for molding in foundry. *Asian Journal of Science and Applied Technology*. 2018. Vol. 7, No. 1. P. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.51983/ajsat-2018.7.1.1025>
2. Лютий Р. В., Селівьорстов В. Ю., Іванов В. Г., Ямшинський М. М. Зв'язувальні матеріали для ливарних форм і стрижнів: проблеми і перспективи. *Метал та лиття України*. 2022. Т. 30, № 2 (329). С. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>
3. Sheladiya M. V., Acharya S. G., Pandya J. G., Acharya G. D. Sensitivity analysis of furan-no-bake sand mold system parameters. *The IUP Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. XII, No. 4. P. 22–29. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3796050>
4. Dobosz St. M., Major-Gabryś K., Grabarczyk A. New materials in the production of moulding and core sands. *Archives of Foundry Engineering*. 2015. Vol. 15, Issue 4. P. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.1515/afe-2015-0073>
5. Holtzer M., Daňko R., Kmita A. Influence of a reclaimed sand addition to moulding sand with furan resin on its impact on the environment. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2016. Vol. 227. Article 16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2707-9>
6. Бушуй Н. М., Пашинський В. В. Перспективи впровадження Cold-Vox та ХТС-процесів при модернізації ливарного виробництва. *Start in Science: студентська науково-технічна конференція: збірник тез і анотацій наукових доповідей*. Одеса: Олді+, 2025. С. 40–41.
7. Campbell J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. 978 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01548-1>
8. Acharya S. G., Vadher J. A., Sheladiya M. A Furan No-Bake Binder System Analysis for Improved Casting Quality. *International Journal of Metalcasting*. 2016. Vol. 10, No. 4. P. 491–499. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0059-x>
9. Acharya S. G., Vadher J. A., Kanjariya P. V. Identification and Quantification of Gases Releasing From Furan No Bake Binder. *Archives of Foundry Engineering*. 2016. Vol. 16, No. 3. P. 5–10. DOI: <https://doi.org/10.1515/afe-2016-0039>
10. Chate G. R., Patel G. C. M., Deshpande A. S., Parappagoudar M. B. Modeling and optimization of furan molding sand system using design of experiments and particle swarm optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 232, No. 5. P. 579–598. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954408917728636>

REFERENCES:

1. Mhamane, D. A., Rayjadhav, S. B., & Shinde, V. D. (2018). Analysis of chemically bonded sand used for molding in foundry. *Asian Journal of Science and Applied Technology*, 7(1), 11–16. <https://doi.org/10.51983/ajsat-2018.7.1.1025>
2. Liutyi, R. V., Seliviorstov, V. Yu., Ivanov, V. H., & Yamshynskiy, M. M. (2022). Zviazuvalni materialy dlia lyvarnykh form i stryzhniv: problemy i perspektyvy [Binding materials for foundry molds and cores: problems and prospects]. *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, 30(2), 72–82. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005> [in Ukrainian]
3. Sheladiya, M. V., Acharya, S. G., Pandya, J. G., & Acharya, G. D. (2019). Sensitivity analysis of furan-no-bake sand mold system parameters. *The IUP Journal of Mechanical Engineering*, 12(4), 22–29. <https://ssrn.com/abstract=3796050>
4. Dobosz, S. M., Major-Gabryś, K., & Grabarczyk, A. (2015). New materials in the production of moulding and core sands. *Archives of Foundry Engineering*, 15(4), 25–28. <https://doi.org/10.1515/afe-2015-0073>

5. Holtzer, M., Dańko, R., & Kmita, A. (2016). Influence of a reclaimed sand addition to moulding sand with furan resin on its impact on the environment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227, Article 16. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2707-9>
6. Bushui, N. M., & Pashynskyi, V. V. (2025). Perspektyvy vprovadzhennia Cold-Box ta KhTS-protsesiv pry modernizatsii lyvarnoho vyrobnytstva [Prospects for implementation of Cold-Box and HTS processes in foundry modernization]. *Start in Science: Student Scientific and Technical Conference Proceedings*, 40–41. [in Ukrainian]
7. Campbell, J. (2015). *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01548-1>
8. Acharya, S. G., Vadher, J. A., & Sheladiya, M. (2016). A furan no-bake binder system analysis for improved casting quality. *International Journal of Metalcasting*, 10(4), 491–499. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0059-x>
9. Acharya, S. G., Vadher, J. A., & Kanjariya, P. V. (2016). Identification and quantification of gases releasing from furan no-bake binder. *Archives of Foundry Engineering*, 16(3), 5–10. <https://doi.org/10.1515/afe-2016-0039>
10. Chate, G. R., Patel, G. C. M., Deshpande, A. S., & Parappagoudar, M. B. (2018). Modeling and optimization of furan molding sand system using design of experiments and particle swarm optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 232(5), 579–598. <https://doi.org/10.1177/0954408917728636>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

UDC 621.744.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-13>

THE INFLUENCE OF MOLD TYPE ON SURFACE QUALITY PARAMETERS AND STRUCTURE IN THE PRODUCTION OF ARTISTIC CASTINGS USING PATTERNS OBTAINED BY ADDITIVE METHODS

Gnatenko Mykhailo Olehovych,

Doctor of Philosophy,

Senior Lecturer at the Department of Machines and Technology of Foundry Production

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

ORCID ID: 0000-0002-7613-852X

Matveishyn Mykyta Vitaliovych,

Senior Lecturer at the Department of Machines and Technology of Foundry Production

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

ORCID ID: 0000-0001-6050-310X

Serhiienko Olha Serhiivna,

Associate Professor at the Department of Machines and Technology of Foundry Production

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

ORCID ID: 0000-0001-6050-310X

Ivanov Valery Hryhorovych,

Head of the Department of Machines and Technology of Foundry Production

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

ORCID ID: 0000-0002-9216-3493

Purpose. To investigate the influence of different molding materials on the surface quality and structural characteristics of bronze castings, and to evaluate the technological advantages of combining additive manufacturing (with investment casting for producing bronze artworks).

Research Methods. Technologies Compared: The study investigated casting methods: Lost-PLA Plaster (IC), no-bake molds (NB), and sand-clay molds (SC).

Master Model: A 3D-printed PLA master model was used. For NB and SC molds, a non-destructive model was used, while for IC, the PLA was removed during thermal burnout process (700 °C for one hour).

Design Parameters: The model design incorporated specific casting parameters: draft angles of 2°, minimum wall thicknesses of 2 mm, and machining allowances of 1 mm.

Analysis: The study analyzed surface roughness (Ra and Rz), grain size, porosity, and mold cooling rates.

Results. Surface Quality: Lost-PLA Plaster Investment casting (IC) produced the best results with the lowest surface roughness (Ra = 2.8 µm, Rz = 12.5 µm), highest relief fidelity, absence of gas porosity, and minimal burn-on. No-bake (NB) molds showed intermediate quality, and sand-clay (SC) molds had the poorest indicators. *Microstructure:* Grain size analysis matched the surface quality trend. IC produced the finest microstructure (25.3 µm), followed by NB (25.5 µm) and SC (27.8 µm).

Cooling Rates: The grain size directly correlated with the cooling rates of the molds: 1.2 °C/s for IC, 1.1 °C/s for NB, and 0.9 °C/s for SC. *PLA Removal:* The PLA model was successfully burned out without damaging the plaster shell, ensuring high geometric accuracy. *Final Output:* The combined IC and additive manufacturing process yielded high-quality bronze castings featuring 0.5% porosity, 95% equiaxed grains, and a controlled grain size of 25±2 µm.

Scientific Novelty. The research establishes a direct correlation between specific cooling rates of different mold types (IC, NB, SC) and the resulting microstructural and surface properties of bronze castings. Furthermore, it validates specific operational parameters—such as a 300 °C burnout temperature and precise geometric design allowances—for successfully integrating 3D-printed PLA models into the investment casting process to achieve highly uniform, defect-free bronze artworks.

Key words: Investment casting, artistic casting, bronze, 3D printing, 3D modeling.

Гнатенко Михайло, Матвейшин Микита, Сергієнко Ольга, Іванов Валерій. Вплив типу форми на параметри якості поверхні та структуру при виготовленні художніх виливків із використанням моделей, отриманих адитивними методами

Мета дослідження. Дослідити вплив різних формувальних матеріалів на якість поверхні та структурні характеристики бронзових, художніх виливків, а також оцінити технологічні переваги поєднання адитивного виробництва із процесом лиття за виплавлюваними моделями при виготовленні бронзових художніх виробів.

Методи дослідження. У дослідженні розглядали три методи лиття: лиття за випалюваними моделями у гіпсові форми (ЛВМ), лиття в самотвердіючі форми (СС) та лиття у піщано-глиняні форми (ПГС).

Майстер-модель: Для лиття в землю та СС застосовувалася неруйнівна модель, а для ЛВМ з PLA, модель видаляли при температурі 400 °C протягом години.

Проводився аналіз шорсткості поверхні (R_a і R_z), розміру зерен, пористості та швидкостей охолодження форм.

Результати. Якість поверхні: Найкращі результати були отримані методом ЛВМ, що дозволило забезпечити найменшу шорсткість поверхні ($R_a = 2.8$ мкм, $R_z = 12.5$ мкм), найвищу точність передачі рельєфу, відсутність газової пористості та мінімальний пригар. Виливки, отримані ХТС, показали середній рівень якості поверхні, а піщано-глиняні – найгірший.

Дослідження мікроструктури проводилися шляхом визначення розміру зерна у поверхневій зоні виливків, для ЛВМ склав (25.3 мкм), для – СС (25.5 мкм) і ПГС (27.8 мкм).

Швидкість охолодження: Розмір зерен прямо корелював зі швидкістю охолодження форм: 1.2 °C/с для ЛВМ, 1.1 °C/с для СС і 0.9 °C/с для ПГС.

Видалення PLA-моделі: Модель успішно випалювалася без пошкодження керамічної оболонки, що забезпечило високу геометричну точність.

Кінцевий результат: Комбінація технологій ЛВМ та адитивного виробництва забезпечила високоякісні бронзові виливки з пористістю 0.5%, 95% рівновісних зерен і контрольованим розміром зерен 25 ± 2 мкм.

Наукова новизна. Дослідження встановлює прямий зв'язок між певними швидкостями охолодження різних типів форм (ЛВМ, СС, піщано-глиняста) і відповідними мікроструктурними та поверхневими властивостями художніх, бронзових виливків. Крім того, підтверджено ефективність технологічних параметрів – таких як температура випалювання 400 °C і точні конструктивні припуски – для успішної інтеграції 3D-друкованих моделей з PLA у процес лиття за випалюваними моделями, що дозволяє отримати рівномірні, бездефектні бронзові мистецькі виливки.

Ключові слова: ЛВМ, Художнє лиття, лиття бронзи, 3D моделювання, 3D друк.

Introduction. Bronze alloys are among the most common materials in modern artistic casting and the production of awards and medals. Their popularity is due to their attractive appearance, good casting properties, and durability of the finished products [1; 2]. Artistic bronze products, such as sculptures, jewelry, commemorative medals, and award badges, are valued for their aesthetic and decorative qualities.

Bronze casting technologies are constantly evolving. Among modern methods, the most notable are investment casting using plaster shell molds and pressure die casting in metal molds [3]. These technologies ensure high surface quality and accurate reproduction of details in artistic products. However, their implementation is often limited by the cost of equipment and the complexity of mold manufacturing.

Along with progressive methods, traditional casting technologies using single-use sand molds remain in demand for artistic casting. In particular, sand-clay mixtures (SCM), cold-box sand mixtures (no-bake process), and plaster-based molds are widely used. The advantages of these methods include the availability of molding materials, the relative simplicity of mold production, and the ability to obtain castings with complex configurations and large sizes [4; 5].

Research materials and methods. The first stage of the research was to create a 3D model of the medal in the Rhinoceros (Rhino) 7.0 design system. Rhino was chosen as a convenient tool for modeling complex curved surfaces with the

possibility of subsequent printing on a 3D printer [9]. When developing the medal geometry, the specifics of the casting technology were taken into account. In particular, to facilitate the removal of the model from the mold, draft angles of at least 3° were provided on the vertical surfaces [10]. Special attention was paid to the formation of draft angles on small relief elements such as letters and patterns. The dimensions of the medal were chosen based on the manufacturability of casting and the requirements for the finished product: a diameter of 120 mm and a maximum thickness of 15 mm.

The 3D model created in Rhino was checked for the absence of geometry defects (surface discontinuities, self-intersections, etc.) that could interfere with quality printing or the formation of the casting mold. To evaluate the casting characteristics of the model, a computer simulation of metal pouring and solidification was carried out in the MagmaSoft system [11]. Based on the simulation results, minor adjustments were made to the geometry to prevent probable casting defects.

For the production of the master pattern, additive manufacturing technology was used, namely Fused Deposition Modeling (FDM). The FDM printing was performed on an Ultimaker 2+ 3D printer using PLA plastic with a layer thickness of 0.2 mm. This approach allows for the quick and cost-effective production of accurate master patterns for the subsequent manufacture of casting molds [12; 13]. The printed PLA model was processed and prepared for molding.

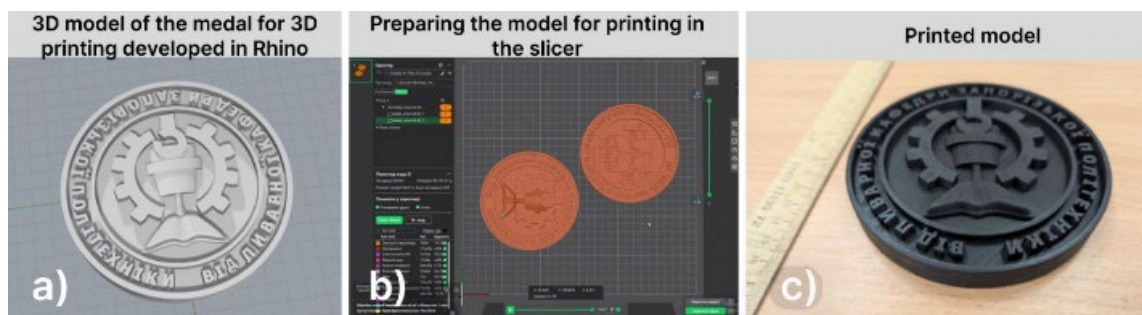


Fig. 1. 3D model of the medal developed in Rhino and preparation for 3D printing in the slicer

When creating the 3D model of the medal, special attention was paid to the formation of complex relief with fine elements (gear teeth, inscriptions, decorative symbols). This made it possible to assess the ability of different types of casting molds to reproduce fine surface details. Thus, the stage of 3D modeling and master pattern production is an important prerequisite for the successful casting of an artistic product. The use of modern CAD/CAM/CAE systems in combination with additive technologies allows optimizing the geometry of the cast part, anticipating and eliminating potential defects, and accelerating and reducing the cost of manufacturing a high-quality master pattern. To examine the influence of mold type on the surface quality of bronze castings, three mold variants were produced using the same master pattern: a sand-clay mold, a no-bake mold, and a plaster mold.

The sand-clay mold was prepared following conventional foundry practice from a molding mixture consisting of recycled molding clay, quartz sand, and water [14]. After compaction and drying, the mold surface was coated with a refractory wash based on kyanite–sillimanite.

The no-bake mold was manufactured from a mixture consisting of quartz sand with the addition of 1.5–2% phenol-formaldehyde resin (relative to the sand mass) and a catalyst in the amount of 15–20% of the resin mass. The components were homogenized in a paddle mixer until uniform distribution of the binder system was achieved. The prepared mixture was placed into the flask around the master pattern and compacted by vibration. To enhance the surface finish of the final casting, a graphite-based coating was applied onto the mold cavity surface [2].

To form the casting cavity in the block plaster mold, a hybrid pattern assembly was prepared. A gating and runner system, made of casting wax, was attached to the 3D-printed PLA master pattern. The use of low-melting-point wax for the gating system enables its complete evacuation during the initial dewaxing stage (Figure 2). This creates

unobstructed channels for gas venting during the subsequent high-temperature burnout (thermal degradation) of the polymer pattern.



Fig. 2. Hybrid pattern assembly: a 3D-printed PLA master pattern with an attached wax gating system

The plaster mold was produced from a mixture of construction gypsum, quartz sand, and water in a mass ratio of 1:2:0.7. Prior to molding, the master pattern surface was treated with a release agent; the sprue and risers were formed from modelling PLA and affixed to the pattern. The assembly was subsequently immersed layer by layer into the plaster slurry until a sufficient shell thickness was achieved. After setting, the Plaster investment mold was thermal burnout process at 700 °C for 1 hour to remove the PLA pattern, and then the mold was fired at 900–1000 °C to burn out PLA or organic materials and to develop the required strength.

Before metal pouring, the molds were preheated to 150–200 °C to remove residual moisture and improve the mold filling capability [15].

In summary, three mold systems differing in molding-mixture composition and fabrication technology were produced. This enables a comparative assessment of how these parameters affect the surface quality of artistic bronze castings.

Results. Visual inspection and profilometric measurements of the obtained castings revealed a significant difference in surface quality depending

on the type of mold used. The sample produced in the plaster mold exhibited a uniform metallic surface sheen and a minimal amount of burn-on. Fine relief elements such as gear teeth, font contours, and the boundaries of decorative symbols were reproduced with high fidelity. Profilo-metric analysis showed low roughness values: the arithmetic mean deviation of the profile $R_a = 2.8 \mu\text{m}$, the ten-point height of irregularities $R_z = 12.5 \mu\text{m}$, and the maximum profile height $R_{\text{max}} = 14 \mu\text{m}$. According to visual evaluation, burn-on and gas porosity were practically absent (1 and 0 points out of 5, respective-ly), while relief sharpness received the maximum score (5/5).

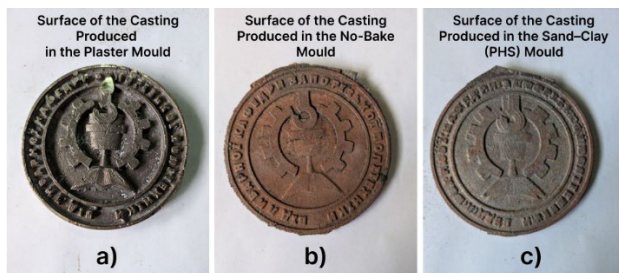


Fig. 3. Comparison of the surface appearance of bronze castings produced in different mold types

Metallographic analysis revealed a coarse-grained dendritic structure in the near-surface layers of the casting produced in the plaster investment mold, which can be attributed to the slow cooling and solidification processes [1; 2]. Such a structure may contribute to reduced plasticity and lower resistance to deformation [3]. It can be assumed that the low gas-forming tendency and high gas permeability of the plaster shell mold, along with its higher heat resistance and smooth cavity surface, ensured intimate contact with the melt without the formation of gas-related defects and minimized burn-on.

The casting obtained from the no-bake (CTS) mold exhibited slightly lower surface quality. Visual examination showed a uniform yet noticeable burn-on, and partial melting and rounding of relief edges were observed due to the thermal degradation of the resin binder. The surface roughness parameters were higher than those for the plaster mold: $R_a = 5.4 \mu\text{m}$, $R_z = 24 \mu\text{m}$, and $R_{\text{max}} = 29 \mu\text{m}$, corresponding to a burn-on rating of 2 points and a relief sharpness rating of 4 points out of 5. Gas porosity was evaluated at 1 point.

Metallographic analysis confirms that mold type decisively impacts bronze casting quality. While plaster molds yield the best surface finish with minimal defects, the no-bake mold showed acceptable intermediate results, exhibiting a slightly larger dendritic structure and minor surface burn-on due to resin gas

evolution and lower refractoriness. Conversely, the sand-clay mold proved completely unsuitable for precision artistic casting. Its high gas-forming tendency and low refractoriness led to a coarse dendritic structure, high porosity, and severe surface defects, including a coarse burn-on layer with up to a 30% loss of relief sharpness. It also recorded the highest roughness parameters ($R_a = 10.6 \mu\text{m}$, $R_z = 46 \mu\text{m}$, $R_{\text{max}} = 54 \mu\text{m}$) and the poorest visual scores (relief: 2/5, burn-on: 4/5), highlighting its inadequacy for precision applications.

Table 1

Comparative Table of Surface Quality Indicators

Indicator	Plaster	NoBake (CTS)	SandClay
$R_a (\mu\text{m})$	2.8	5.4	10.6
$R_z (\mu\text{m})$	12.5	24	46
Burn-on (1–5)	1	2	4
Gas porosity (1–5)	0	1	3
Relief sharpness (1–5)	5	4	2
Visual surface quality	High	Medium	Low

The obtained results are consistent with current understanding of the mechanisms governing casting surface formation and with literature data on the influence of mold type on defect formation [1–6]. The practical significance of this work lies in enabling a justified selection of molding materials and technologies for producing bronze artistic castings with predictable surface quality.

As can be seen, an increase in the thermal conductivity and grain size of the mold material leads to a corresponding rise in surface roughness: R_a increases from approximately $2.8 \mu\text{m}$ (investment casting) to about $10.6 \mu\text{m}$ (sand-clay mold), while R_z increases from 12.5 to $46 \mu\text{m}$. This confirms the significant influence of the molding material type on the surface quality of artistic bronze castings, even when using the same 3D-printed pattern for all three technologies.

A grid with a known spacing ($25 \mu\text{m}$) was super-imposed on the metallographic images of the micro-structure. The number of intersections between grain boundaries and the grid lines was counted. Using equation (4.1), the average chord length of grain intercepts was calculated.

The mean grain size was determined using the intercept method.

The calculation was performed according to the formula:

$$d = \frac{M \cdot l}{n} \quad (1)$$

Where l is the total length of the test lines, M – is the magnification, N – is the number of intersections.

Dependence of Surface Roughness Parameters Ra and Rz on Mould Type

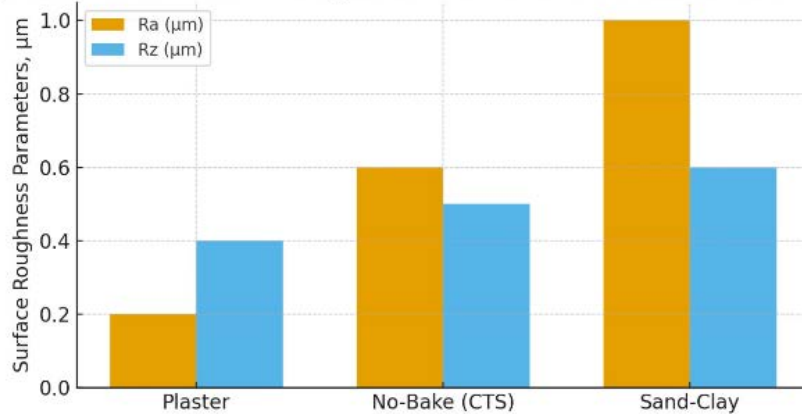


Fig. 4. Graph of the Dependence of Surface Roughness Parameters Ra and Rz on the Type of Mold

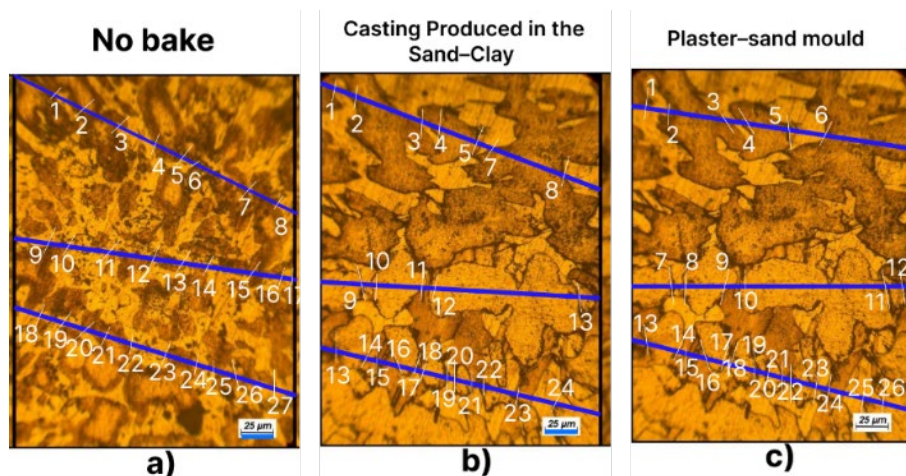


Fig. 5. Determination of the Average Grain Size

According to the obtained data, the smallest average grain size ($25.3 \mu\text{m}$) is observed in the casting produced by investment casting (IC), which is associated with the slower cooling and solidification processes in the ceramic shell mold. The casting from the no-bake mold (NB) exhibits a slightly larger grain size ($25.5 \mu\text{m}$), likely due to the exothermic reaction of the resin binder, which reduces the cooling rate. The largest grain size ($27.8 \mu\text{m}$) was found in the casting produced in the sand-clay mold (SC), which is explained by the rapid cooling of the melt in contact with the mold material.

The obtained results correlate with the visual observations of the microstructure and confirm the assumed relationship between mold type and the crystallization behaviour of the metal.

The data presented in Table 2 demonstrates that the smallest average grain size ($25.3 \mu\text{m}$) is observed in samples obtained by the Investment Casting (IC) method. This can be attributed to the

highest cooling and crystallization rates of the alloy in the thin-walled shell ceramic mold.

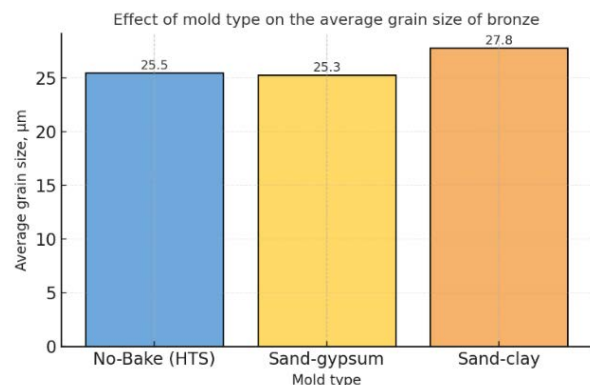


Fig 6. Dependence of Surface-Layer Grain Size on the Type of Mold

A slightly larger grain size ($25.5 \mu\text{m}$) is characteristic of bronze obtained by casting in No-Bake (NB) molds. Evidently, the thermophysical

properties of the cold-hardening mixture provide a somewhat slower cooling of the melt compared to the plaster mold.

Conclusions. The selection of molding material decisively shapes both the surface integrity and microstructural features of bronze castings by regulating heat-transfer dynamics:

Investment Casting: Demonstrated the most favorable combination of properties. It yielded the finest, most uniform grain structure ($25.3\ \mu\text{m}$) and exceptionally low surface roughness ($R_a = 2.8\ \mu\text{m}$, $R_z = 12.5\ \mu\text{m}$) with an almost complete absence of gas-related defects and precise relief reproduction.

No-Bake (NB/CTS) Molds: Provided acceptable surface quality and marginally coarser grains ($25.5\ \mu\text{m}$) due to the thermophysical properties of the cold-hardening mixture, which somewhat slowed the cooling rate.

Sand-Clay Molds: Proved poorly suited for precision casting. Due to lower thermal conductivity

and unstable thermal behavior, they produced the largest grains ($27.8\ \mu\text{m}$) alongside pronounced surface roughness, significant burn-on, and reduced geometric clarity.

A key practical achievement was the successful integration of a 3D-printed PLA master pattern into the investment casting workflow. The polymer was completely removed via burnout at $300\ ^\circ\text{C}$ within 1 hour without compromising the mold, ensuring accurate reproduction of the designed geometry (including draft angles and technological allowances).

Summary: The synergy of additive manufacturing (3D printing) and investment casting is an optimal, cost-effective solution for unique or small-series artistic bronze production. It eliminates the need for expensive metal tooling, significantly reduces lead times, and ensures high-quality castings with complex geometries and superior structural control.

BIBLIOGRAPHY:

1. Nguyen T. T., Tran V. T., Nguyen V., Nguyen V. T. T. Effect of infill ratios in SLA 3D printing on mechanical properties of castable wax patterns for molded shells in investment casting. *PLOS ONE*. 2025. Vol. 20, No. 2. P. e0311245. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311245>. (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311245>)
2. Pelin G., Sonmez M., Pelin C.-E. The use of additive manufacturing techniques in the development of polymeric molds: a review. *Polymers*. 2024. Vol. 16, No. 8. P. 1055. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16081055>. (<https://doi.org/10.3390/polym16081055>)
3. Upadhyay T., Sivarupan T., El Mansori M. 3D printing for rapid sand casting – A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 29. P. 211–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.017>. (<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.017>)
4. Gnatenko M., Naumyk V., Matkovska M. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *Materials Science and Technology 2019 (MS&T19) : contributed papers*. Portland, USA, 2019. P. 68–74.
5. Gnatenko M., Chigileichyk S., Sakhno S. Manufacture of aviation parts from heat-resistant nickel alloys by multilayer plasma surfacing. *Aerospace Technic and Technology*. 2021. No. 5 (175). P. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.5.06>. (<https://doi.org/10.32620/aktt.2021.5.06>)
6. Abisuga O. A. et al. Study of investment casting process for 3D-printed design as an option for jewellery manufacturing. *MATEC Web of Conferences (RAPDASA 2022)*. 2022. Vol. 237. P. 04002. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202237004002>. (<https://doi.org/10.1051/mateconf/202237004002>)
7. Bobby S. S., Singamneni S. Influence of moisture in the Gypsum molds made by 3D printing. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 97. P. 1618–1625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.304>. (<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.304>)
8. Espinoza-Cuadra J., Gallegos-Acevedo P., Mancha Molinar H., Pikado A. Effect of Sr and solidification conditions on characteristics of intermetallic in Al–Si 319 industrial alloys. *Materials and Design*. 2010. Vol. 31, No. 1. P. 343–356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.045>. (<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.045>)
9. Popielarski P., Ignaszak Z. Effective modelling of phenomena in over-moisture zone existing in porous sand mold subjected to thermal shock. *Drying and Energy Technologies. Advanced Structured Materials*. Cham : Springer, 2016. Vol. 63. P. 141–164. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_10. (https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_10)
10. PN-EN 12524. Building materials and products. Hygrothermal properties – tabulated calculation values. EN 12524:2000. Brussels : CEN, 2000.
11. Birosz M. T., Ferenczy K., Andó M. Application of 3D printing in casting. *Mérnöki és Informatikai Megoldások / Engineering and Informatics Solutions II*. 2021. P. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.37775/EIS.2021.2.1>. (<https://doi.org/10.37775/EIS.2021.2.1>)

12. Guler K. A., Çiğdem M. Casting quality of gypsum bonded block investment casting molds. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 445. P. 349–354. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.445.349>. (<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.445.349>)
13. Nedelcu D., Radu A., Stan S. Gypsum-bonded molds for casting of non-ferrous alloys: properties and microstructure. *Archives of Foundry Engineering*. 2021. Vol. 21, No. 2. P. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.24425/afe.2021.136092>. (<https://doi.org/10.24425/afe.2021.136092>)
14. Lin Y.-C., Chen T.-C. et al. Influences of material selection, infill ratio, and layer height in the 3D printing cavity process on the surface roughness of printed patterns and casted products in investment casting. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 3. P. 941. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16030941>. (<https://doi.org/10.3390/ma16030941>)

REFERENCES:

1. Nguyen, T. T., Tran, V. T., Nguyen, V., & Nguyen, V. T. T. (2025). Effect of infill ratios in SLA 3D printing on mechanical properties of castable wax patterns for molded shells in investment casting. *PLOS ONE*, 20(2), e0311245. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311245>
2. Pelin, G., Sonmez, M., & Pelin, C.-E. (2024). The use of additive manufacturing techniques in the development of polymeric molds: A review. *Polymers*, 16(8), 1055. <https://doi.org/10.3390/polym16081055>
3. Upadhyay, T., Sivarupan, T., & El Mansori, M. (2017). 3D printing for rapid sand casting – A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.017>
4. Gnatenko, M., Naumyk, V., & Matkovska, M. (2019). Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. In *Materials Science and Technology 2019 (MS&T19): Contributed papers* (pp. 68–74). Portland, OR.
5. Gnatenko, M., Chigileichyk, S., & Sakhno, S. (2021). Manufacture of aviation parts from heat-resistant nickel alloys by multilayer plasma surfacing. *Aerospace Technic and Technology*, 5(175), 48–54. <https://doi.org/10.32620/akt.2021.5.06>
6. Abisuga, O. A., Doran, K., & de Beer, D. (2022). Study of investment casting process for 3D-printed design as an option for jewellery manufacturing. *MATEC Web of Conferences*, 237, 04002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202237004002>
7. Bobby, S. S., & Singamneni, S. (2014). Influence of moisture in the Gypsum molds made by 3D printing. *Procedia Engineering*, 97, 1618–1625. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.304>
8. Espinoza-Cuadra, J., Gallegos-Acevedo, P., Mancha Molinar, H., & Pikado, A. (2010). Effect of Sr and solidification conditions on characteristics of intermetallic in Al–Si 319 industrial alloys. *Materials and Design*, 31(1), 343–356. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.045>
9. Popielarski, P., & Ignaszak, Z. (2016). Effective modelling of phenomena in over-moisture zone existing in porous sand mold subjected to thermal shock. In *Drying and energy technologies: Advanced structured materials* (Vol. 63, pp. 141–164). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_10
10. European Committee for Standardization. (2000). *Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated calculation values* (EN 12524:2000). Brussels.
11. Biroş, M. T., Ferenczy, K., & Andó, M. (2021). Application of 3D printing in casting. *Mérnöki és Informatikai Megoldások / Engineering and Informatics Solutions II*, 4–13. <https://doi.org/10.37775/EIS.2021.2.1>
12. Guler, K. A., & Çiğdem, M. (2012). Casting quality of gypsum bonded block investment casting molds. *Advanced Materials Research*, 445, 349–354. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.445.349>
13. Nedelcu, D., Radu, A., & Stan, S. (2021). Gypsum-bonded molds for casting of non-ferrous alloys: Properties and microstructure. *Archives of Foundry Engineering*, 21(2), 67–74. <https://doi.org/10.24425/afe.2021.136092>
14. Lin, Y.-C., Chen, T.-C., et al. (2023). Influences of material selection, infill ratio, and layer height in the 3D printing cavity process on the surface roughness of printed patterns and casted products in investment casting. *Materials*, 16(3), 941. <https://doi.org/10.3390/ma16030941>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 09.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 669.02/09:62-8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-14>**ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ КИСНЕВОГО КОНВЕРТЕРА****Грибков Едуард Петрович,**

доктор технічних наук, професор,

завідувач кафедри металургії та інноваційних технологій

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-1565-6294

Малій Олександр Геннадійович,

викладач циклової комісії з автоматизації металургійного

виробництва та механічного обладнання

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0009-1352-3867

Пушкарєнко Олександр Олександрович,

здобувач вищої освіти

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0003-1660-4394

У роботі розглянуто актуальну задачу підвищення надійності та довговічності елементів приводів кисневих конвертерів як важконавантажених металургійних агрегатів в умовах інтенсифікації виробництва та обмежених можливостей оновлення обладнання. Запропоновано удосконалену методику розрахунку навантажень у приводі механізму нахилу кисневого конвертера з урахуванням динамічних явищ, що виникають під час його пуску та роботи в різних експлуатаційних режимах. Розроблена математична модель базується на дискретизації об'єму рідкого металу на кінцеву множину елементарних об'ємів із визначенням їх геометричних параметрів і координат центрів тяжіння. На основі подальшого інтегрування отримано залежність перекидаючого моменту від кута нахилу конвертера з урахуванням зміни форми дзеркала металу та перерозподілу маси. Це дозволяє більш точно враховувати реальний характер навантаження у порівнянні з традиційними графоаналітичними методами. Динамічні навантаження у приводній системі визначено на основі двомасової моделі з пружними зв'язками, що описується системою диференціальних рівнянь руху. У межах цієї моделі враховано інерційні характеристики елементів приводу, жорсткість системи, параметри електропривода та змінні зовнішні навантаження. Отримано аналітичні залежності для визначення кутів закручування та моментів у пружних ланках, що дозволяє оцінити пікові та циклічні навантаження в приводних валах. На основі імітаційного моделювання, що поєднує метод схематизації складних режимів навантаження та статистичний метод Монте-Карло, визначено функцію розподілу довговічності елементів приводу. Запропонований підхід враховує стохастичний характер експлуатаційних навантажень та їх історію, що забезпечує більш достовірну оцінку ресурсу приводних валів. Проведений аналіз показав істотний вплив геометричних характеристик валів (зокрема моменту опору перерізу) на їх довговічність. Розроблена методика може бути використана для автоматизованого розрахунку та проєктування приводів кисневих конвертерів і інших металургійних агрегатів, а також для обґрунтування конструктивних рішень, спрямованих на підвищення їх експлуатаційної надійності та ресурсу.

Ключові слова: конвертер кисневий, привід, момент перекидаючий, навантаження динамічні, модель математична.

Hrybkov Eduard, Malii Oleksandr, Pushkarenko Oleksandr. Determining the service life of oxygen converter drive component

The paper addresses the relevant problem of improving the reliability and service life of drive components of basic oxygen converters as heavily loaded metallurgical units under conditions of intensified production and limited opportunities for equipment modernization. An advanced methodology for calculating loads in the tilting drive system of a basic oxygen converter is proposed, considering dynamic effects occurring during start-up and operation under various service conditions. The developed mathematical model is based on discretization of the molten metal volume into a finite set of elementary volumes with determination of their geometric parameters and coordinates of centers of gravity. Subsequent integration makes it possible to obtain the dependence of the overturning moment on the converter tilt angle, considering variations in the shape of the molten bath surface and mass redistribution. This approach provides a more accurate representation of the actual loading conditions compared to conventional graphical-analytical methods. Dynamic loads in the drive system are determined using a two-mass model with

elastic couplings, described by a system of differential equations of motion. Within this framework, the inertial characteristics of drive components, system stiffness, electric drive parameters, and variable external loads are considered. Analytical relationships are obtained for determining torsional angles and torques in elastic elements, enabling evaluation of peak and cyclic loads in drive shafts. Based on simulation modeling combining load cycle schematization and the Monte Carlo method, the lifetime distribution function of drive components is determined. The proposed approach accounts for the stochastic nature of operational loads and their loading history, ensuring a more reliable assessment of drive shaft durability. The analysis revealed a significant influence of shaft geometric characteristics, particularly the section modulus, on service life. The proposed methodology can be applied for computer-aided analysis and design of basic oxygen converter drives and other metallurgical equipment, as well as for substantiating design solutions aimed at improving operational reliability and extending service life.

Key words: basic oxygen converter, drive system, overturning moment, dynamic loads, mathematical model.

Інтенсифікація металургійного виробництва, а також відсутність масштабних капіталовкладень для оновлення існуючого та створення нового механічного обладнання металургійних машин вимагає підвищення міцності і надійності приводних ліній важко навантажених металургійних машин, до яких відносяться і кисневі конвертери.

У ряді робіт, зокрема у роботах [1–6], було досліджено динамічні явища в приводах кисневих конвертерів на основі багато масової розрахункової схеми. Одним із основних параметрів, необхідним для динамічної моделі кисневого конвертера, є зовнішні навантаження. Визначення моментів, що опрокидують, посудин довільної форми з рідким металом внаслідок зміни форми рідкого металу та зміщення центру тяжіння при різних кутах повороту посудини є складним завданням. При розрахунках користуються наближеними графоаналітичними методами, з яких найбільше практичне застосування отримали універсальні методи П. Н. Аксьонова, Д. А. Заводчикова та Є. А. Рохмана [7; 8].

Метою роботи є підвищення працездатності та вдосконалення конструкцій приводів

кисневих конвертерів на основі розвитку методів автоматизованого розрахунку та проектування. Для досягнення зазначеної мети в роботі поставлено та вирішено такі основні завдання: уточнити інженерну методику розрахунку енергосилових параметрів процесу перекидання сталерозливних ківшів та кисневих конвертерів; розробити комплекс математичного та програмного забезпечення з автоматизованого розрахунку довговічності елементів приводу кисневих конвертерів.

Основним завданням при математичному моделюванні процесу перекидання кисневого конвертера, а також процесу перекидання інших ємностей з різного роду рідинами, є визначення витрати, а також величини моменту, що створюється обсягом рідини, що залишився в залежності від поточного кута перекидання φ . Внаслідок неоднозначності і громіздкості математичного апарату безпосереднє вирішення даного завдання доцільно здійснювати чисельно за допомогою ЕОМ, а використувана в цьому випадку розрахункова схема представлена на рис. 1.

Здійснивши розбиття висоти конвертера на KR елементарних об'ємів товщиною $\Delta y = H/K_R$

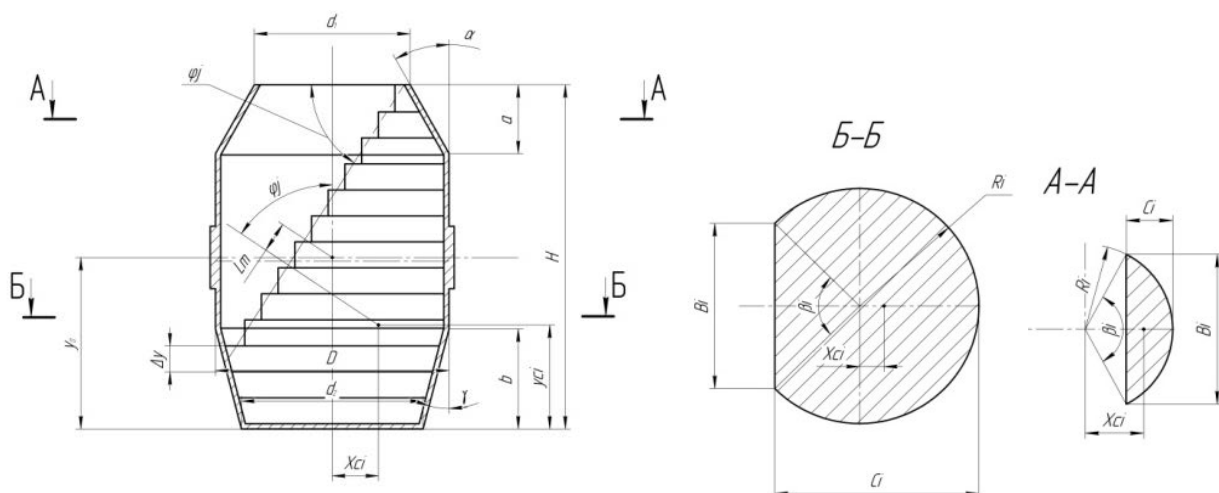


Рис. 1. Розрахункова схема кисневого конвертера

змінивши безліч усічених конусів, що виявилися, на таку ж безліч циліндрів визначимо геометричну координату середньої площини для кожного з них:

$$y_i = H - \Delta y(i - 0,5), \quad (1)$$

де i – порядковий номер елементарного об'єму з початком відліку верхньої частини ковша.

Для оптимізації розрахунку геометричних параметрів кожного елементарного об'єму розіб'ємо конвертер на три основні частини, верхня конусна частина, середня циліндрична та нижня конусна частина залежно від кута перекидання:

Визначивши кут нахилу утворює внутрішньої поверхні верхньої частини конвертера до вертикалі як:

$$\alpha = \arctg \frac{a}{(D-d_1)/2}. \quad (2)$$

Виразимо значення радіуса середньої площини для кожного елементарного об'єму верхньої частини конвертера в такому вигляді:

$$R_i = d_1/2 + (H-y_i) \operatorname{tg} \alpha, \quad (3)$$

З урахуванням поточного в j -й момент часу кута повороту сталерозливного ковша ϕ_j визначимо геометричний параметр C_i , що характеризує форму і площу дзеркала сталі на рівні: верхньої конусної частини

$$C_i = (H - y_i) \operatorname{tg}(\pi/2 - \phi) + (H - y_i) \operatorname{tg}(\phi); \quad (4)$$

середньої циліндричної частини

$$R_i = D/2,$$

$$C_i = (H - y_i) \operatorname{tg}(\pi/2 - \phi) + (D - d_1)/2, \quad (5)$$

нижньої конусної частини

$$\gamma = \arctg(D - d_1/2b), \quad (6)$$

$$R_i = D/2 - y_i \operatorname{tg} \gamma, \quad (7)$$

$$C_i = (H - y_i) \operatorname{tg}(\pi/2 - \phi) - y_i \operatorname{tg}(\phi). \quad (8)$$

Подальше визначення геометричних характеристик кожного елементарного об'єму рідкої сталі необхідно здійснювати диференційовано залежно від співвідношення параметра C_i і радіуса внутрішньої поверхні R_i . Так, при $C_i \geq R_i$ переріз є сегментом з центральним кутом β_i і основою B_i (див. рис. 1 переріз Б-Б) рівними:

$$\beta_i = 2 \arccos[(R_i - C_i) / R_i], \quad (9)$$

$$b_i = 2R_i \sin(\beta_i / 2), \quad (10)$$

$$F_i = R_i^2 \beta_i / 2 - b_i (R_i - C_i) / 2, \quad (11)$$

з урахуванням чого геометрична координата центру ваги становитиме

$$x_{ci} = b_i^3 / (12F_i). \quad (12)$$

Аналогічно для випадку $R_i < C_i < 2R_i$ (див. рис. 1. переріз Б-Б):

$$\beta_i = \arccos[(C_i - R_i) / R_i], \quad (13)$$

$$b_i = 2R_i \sin(\beta_i / 2), \quad (14)$$

$$F_i = \pi R_i^2 - R_i \beta_i / 2 + b_i (C_i - R_i) / 2, \quad (15)$$

$$x_{ci} = b_i^3 R_i / [12(\pi - F_i / \pi R_i^2) R_i^3]. \quad (16)$$

І, нарешті, при $2R \leq C_i$ елементарні об'єми являють собою повні замкнуті циліндри з площею

$$F_i = \pi R_i^2 \quad (17)$$

та координатою центру тяжкості $x_{ci} = 0,0$.

З урахуванням відомих площ F_i може бути визначений і весь обсяг сталі V_j , що відповідає даному куту повороту:

$$V_j = \sum_{i=1}^{K_R} F_i \Delta y, \quad (18)$$

а з урахуванням геометричних координат центрів тяжіння елементарних обсягів можуть бути визначені і координати центру тяжкості всієї сталі:

$$y_{ci} = \sum_{i=1}^{K_R} F_i \Delta y \frac{y_i}{V_j}, \quad (19)$$

$$x_{ci} = \sum_{i=1}^{K_R} F_i \Delta x \frac{x_i}{V_j}, \quad (20)$$

слідуючи чому величина перекидаючого моменту на даний час, тобто. при даному вугіллі повороту ϕ_j складе:

$$\begin{aligned} M_j &= G_j I_{mj} = V_j \rho \left(y_0 - y_{cj} - \frac{x_{cj}}{\operatorname{tg} \phi} \right) \sin \phi = \\ &= V_j \rho \left[(y_0 - y_{cj}) \sin \phi - x_{cj} \cos \phi \right], \end{aligned} \quad (21)$$

де j , L_{mj} – вага сталі і плече додатка щодо осі обертання (див. рис. 1).

З достатньою для практичних розрахунків точністю дослідження динамічних процесів у приводі механізму перекидання конвертера можна проводити за двомасовою системою з одним ступенем свободи. Приведення навантажень і параметрів у цьому випадку будемо здійснювати до валу механізму повороту конвертера.

Рівняння руху системи мають вигляд:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\phi}_1 - c(\phi_2 - \phi_1) = M_1; \\ I_2 \ddot{\phi}_2 - c(\phi_2 - \phi_1) = -M_2 \end{cases}, \quad (22)$$

де ϕ_1, ϕ_2 – кути повороту мас I_1, I_2 , рад;

M_1 – момент електродвигуна, Н·м;

M_2 – момент перекидання конвертера, Н·м;

c – коефіцієнт жорсткості, Н·м/рад.

Момент перекидання конвертера M_2 визначиться як функція від кута повороту корпусу конвертера ϕ залежно (21).

Момент M_1 створюється електродвигуном механізму перекидання конвертера:

$$M_1 = (N_{\text{дв}} / \omega_{\text{дв}}) U \eta, \quad (23)$$

де $N_{\text{дв}}$ – потужність електродвигуна;

η – к.к.д. передач.

$\phi = \omega t$ – кут нахилу корпусу конвертера від вертикальної осі, рад;

$\omega = \omega_{\text{дв}} / U$ – кутова швидкість повороту корпусу конвертера, рад/с;

$\omega_{\text{дв}} = \pi n / 30$ – кутова швидкість обертання електродвигуна, рад/с;

n – частота обертання ротора електродвигуна;

U – передатне відношення редуктора.

Спільне рішення системи рівнянь (22) та (23) дає вихідне диференціальне рівняння для визначення відносного кута закручування $\phi = \phi_2 - \phi_1$:

$$\ddot{\phi}_2 - \ddot{\phi}_1 = -c \frac{I_1 + I_2}{I_1 I_2} (\phi_2 - \phi_1) + \frac{M_1 I_2 - M_2 I_1}{I_1 I_2}$$

$$\text{або } \ddot{\phi}_2 - \ddot{\phi}_1 = -p^2 (\phi_2 - \phi_1) + \frac{M_1}{I_1} + \frac{M_2}{I_2}, \quad (24)$$

де $p = \sqrt{c(I_1 + I_2) / (I_1 I_2)}$ – власна частота коливань системи.

Розв'язання диференціального рівняння (24):

$$\phi_2 - \phi_1 = \phi_1 + \phi_2 = C_1 \sin pt + C_2 \cos pt + \frac{M_1}{I_1 p^2} + \frac{P_{\text{кон}} a}{I_2 (p^2 - \omega^2)} \sin \omega t. \quad (25)$$

Постійні інтегрування C_1 та C_2 визначаються з початкових умов:

$$C_1 = -\frac{\omega}{I_2 p (p^2 - \omega^2)} M_2; \quad C_2 = 0. \quad (26)$$

В результаті відносний кут повороту ϕ складе:

$$\phi = \frac{M_2}{I_2 (p^2 - \omega^2)} \left(1 - \frac{\omega}{p}\right) + \frac{M_1}{I_1 p^2}, \quad (27)$$

а величина відновлювального моменту в пружному зв'язку визначатиметься виразом

$$M = c\phi. \quad (28)$$

Розглянуті залежності (22)...(28) дозволяють з достатньою для практичних розрахунків точністю наближення досліджувати динамічні навантаження у валі приводу механізму повороту конвертера.

Під час пуску, коли корпус конвертера нерухомий, диференціальне рівняння рух першої маси матиме вигляд:

$$I_1 \frac{d^2 \phi_1}{dt^2} + c\phi_1 = M_1. \quad (29)$$

Власна частота при цьому дорівнюватиме:

$$p = \sqrt{c / I_1}. \quad (30)$$

Рішення рівняння (29):

$$\phi_1 = A \cos pt + B \sin pt + M_1 / I_1 p^2. \quad (31)$$

Початкові умови під час пуску механізму:

$$t = 0; \phi_1 = 0; \omega_1 = 0; A = -M_1 / I_1 p^2; B = 0. \quad (32)$$

Час від початку руху першої маси до початку руху другої τ_1 перебуває з умови рівності $M_{12} - M_2$, тобто

$$M_{12} = \phi_1 c = c \frac{M_1}{I_1 p^2} (1 - \cos pt); \quad \tau_1 = \frac{1}{p} \arccos \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right). \quad (33)$$

Рівняння (22)...(33) у поєднанні з математичною моделлю для визначення навантаження при перекиданні склали повний алгоритм для визначення динамічних навантажень у проміжному валі приводу кисневого конвертера.

Як приклад чисельної реалізації розроблених програмних засобів на рис. 2 представлені розрахункові розподіли моментів пружних сил у приводному валі, моменту перекидання та частоти власних коливань за часом роботи. Всі розрахунки виконані стосовно кисневого конвертера ємністю 350 тон.

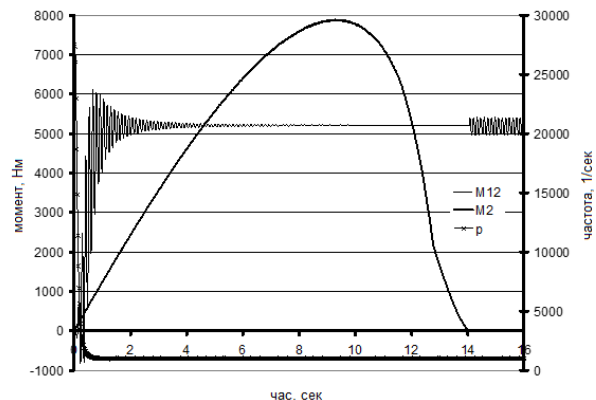


Рис. 2. Зміна моментів та частоти власних коливань системи

З розрахункових розподілів видно, що максимальне значення моменту пружних сил досягає близько 6000 кНм, мінімальний – 800 кНм.

Одним із головних показників надійності є ймовірність безвідмовної роботи до заданого напрацювання в умовах експлуатації. Методика визначення функції розподілу довговічності деталей лінії приводу включала наступні етапи:

1. Визначення вихідних даних, необхідні обчислення зовнішніх навантажень і складання динамічної моделі машини.

2. Визначення з урахуванням запропонованих залежностей характеристик приводних валів.

3. Визначення з урахуванням математичних моделей зовнішніх навантажень.

4. Визначення на основі динамічних моделей навантажень у приводних лініях машини.

5. Схематизація отриманих режимів навантаження приводних валів.

6. На основі ймовірнісного методу визначення функції розподілу довговічності валів приводу металургійних машин.

Як вихідні дані використовувалися геометричні параметри корпусу, маса рідкого металу, моменти інерції рухомих частин приводу конвертера і самого корпусу, потужність електродвигуна, передавальні числа редукторів, швидкісні характеристики.

На рис. 3 представлено функцію розподілу довговічності залежно від моменту опору перерізу валів приводу конвертера. З якого можна зробити висновок про збільшення терміну служби валів при збільшенні моменту опору перерізу, причому при збільшенні останнього з $0,7 \text{ м}^3$ до $1,6 \text{ м}^3$ довговічність збільшується приблизно в 16 разів, при цьому подальше збільшення розмірів валів при зменшенні довговічності.

Висновки. У результаті проведених досліджень розроблено удосконалену методику визначення навантажень у приводі механізму нахилу кисневого конвертера, яка на відміну від традиційних підходів враховує реальний характер динамічних процесів, зміну геометрії рідкого металу та перерозподіл маси під час перекидання агрегату. Запропонована математична модель, що базується на дискретизації об'єму металу на елементарні об'єми з подальшим інтегруванням, дозволяє з достатньою точністю визначати перекидаючий момент як функцію кута нахилу конвертера.

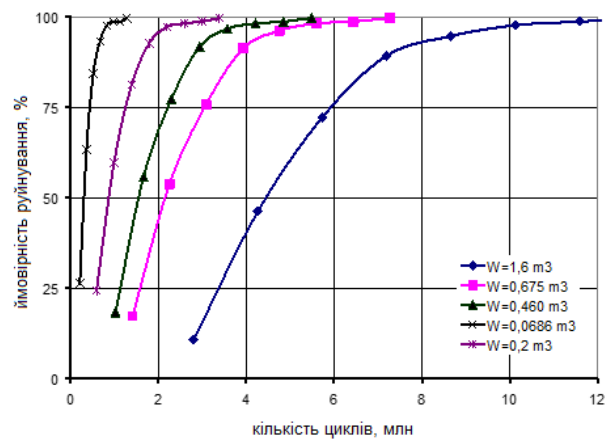


Рис. 3. Зміна частоти власних коливань системи

На основі двомасової динамічної моделі з пружними зв'язками отримано аналітичні залежності для визначення кутів закручування та моментів у приводній системі. Це дало змогу встановити характер зміни навантажень у приводних валах, зокрема визначити їх пікові значення та циклічні коливання, що мають вирішальний вплив на ресурс елементів приводу. Показано, що максимальні значення пружних моментів досягають значних величин, що необхідно враховувати при проєктуванні та модернізації обладнання.

Отримані результати мають практичне значення для автоматизованого розрахунку та проєктування приводів кисневих конвертерів і можуть бути використані при обґрунтуванні конструктивних рішень, спрямованих на підвищення їх надійності, довговічності та ефективності експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zhang Y., Li H., Wang X. Dynamic analysis of electromechanical drive systems under variable load conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 124. P. 245–258. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.10.012
2. Liu C., Wang J. Dynamic modeling and simulation of heavy-duty gear transmission systems. *Mechanism and Machine Theory*. 2018. Vol. 122. P. 84–99. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.09.017
3. Ding Y., Pan J., Liu Q. Dynamic behavior analysis of tilting mechanism in converter systems. *Engineering Failure Analysis*. 2017. Vol. 79. P. 698–708. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.03.021
4. Wang G., Liu Z., Zhang H. Load characteristics and reliability analysis of converter tilting systems. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 229. P. 540–548. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.012
5. Stephens R. I., Fatemi A., Stephens R. R., Fuchs H. O. Metal fatigue in engineering. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2000. 512 p.
6. Dresig H., Holzweißig F. Dynamics of machinery: theory and applications. Dordrecht : Springer, 2010. 376 p.
7. Jones D. R. H. Engineering materials 2: an introduction to microstructures and processing. 4th ed. Oxford : Elsevier, 2013. 480 p.
8. Roberts W. L. Hot rolling of steel. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2018. 892 p.

REFERENCES:

1. Zhang, Y., Li, H., & Wang, X. (2019). Dynamic analysis of electromechanical drive systems under variable load conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 124, 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.10.012>
2. Liu, C., & Wang, J. (2018). Dynamic modeling and simulation of heavy-duty gear transmission systems. *Mechanism and Machine Theory*, 122, 84–99. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.09.017>
3. Ding, Y., Pan, J., & Liu, Q. (2017). Dynamic behavior analysis of tilting mechanism in converter systems. *Engineering Failure Analysis*, 79, 698–708. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.03.021>
4. Wang, G., Liu, Z., & Zhang, H. (2016). Load characteristics and reliability analysis of converter tilting systems. *Journal of Materials Processing Technology*, 229, 540–548. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.012>
5. Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). *Metal fatigue in engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
6. Dresig, H., & Holzweißig, F. (2010). *Dynamics of machinery: Theory and applications*. Springer.
7. Jones, D. R. H. (2013). *Engineering materials 2: An introduction to microstructures and processing* (4th ed.). Elsevier.
8. Roberts, W. L. (2018). *Hot rolling of steel* (2nd ed.). CRC Press.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 669.76.534

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-15>

ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТАЛЕВІЙ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДА СТЕРЕОЛОГІЧНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ

Письмарьов Костянтин Євгенович,

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0003-2372-8398

Єфімова Вероніка Гаріївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри фізичної хімії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
доцент кафедри матеріалознавства, механіки та природничих наук
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-2372-8398

Смірнов Юрій Олексійович,

кандидат економічних наук, доцент
Фізико-технологічного інституту металів та сплавів
Національної академії наук України
ORCID ID: 0009-0009-0479-5828

Малій Христина Василівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри металургії та інноваційних технологій
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-9046-4268

Показано, що шпінель у сталях утворює шкідливі включення, що погіршують якість готового продукту. При цьому на сьогоднішній день остаточно не з'ясовано механізм утворення шпінелі та її стійкість у розплавах сталі, оскільки недостатньо вивчено термодинамічні параметри цих процесів, а саме вільні енергії утворення та активності компонентів у діапазоні твердих розчинів.

З'ясовано, що чисельні наукові дослідження вивчали термодинамічну рівновагу в системах де утворюється шпінель та довели стабільність шпінелі в залежності від вмісту кисню, алюмінію та магнію.

Показано, що метою наших досліджень було визначення вільної енергії утворення магнію та шпінелі за температур стагеллаційних процесів, їх коефіцієнтів активності та визначення до якого типу твердих розчинів можна віднести твердий розчин шпінель з точки зору закону Рауля.

Висвітлено, що на першому етапі наших досліджень було проведено термодинамічний аналіз вільної енергії утворення шпінелі та її складових частин з використанням рівняння ізотерми хімічної реакції, що пов'язує активності реагуючих речовин з константою рівноваги хімічного процесу. Це дозволило встановити основні рівняння, що описують зміну енергії Гіббса з температурою для кожної речовини.

Проведено експериментальні дослідження методом встановлення хімічної рівноваги для визначення коефіцієнтів шпінелі та її складових частин.

Показано, що в процесі визначення активності компонентів у фазі шпінелі, твердий розчин шпінелі з нестехіометричним складом знаходився у рівновазі з рідкою міддю у графітовому тиглі при сталому співвідношенні газів. Після встановлення хімічної рівноваги активність компонентів визначали за рівняннями, що було виведено при проведенні термодинамічного аналізу.

В роботі представлено, що утворення шпінелі у наших дослідках ми підтверджували методом рентгенівської дифракції, та хімічним аналізом. Рівноважний вміст алюмінію та магнію у міді визначали за допомогою індукційно-зв'язаної плазмової спектроскопії.

В процесі досліджень було визначено границі фаз твердого розчину шпінелі з використанням методу дифузійних пар.

В результаті проведеної роботи було визначено вільні енергії утворення оксиду магнію та шпінелі, а також активність цих компонентів з використанням методу хімічної рівноваги. З'ясовано, що твердий розчин шпінелі демонструє від'ємне відхилення від закону Рауля.

Ключові слова: шпінель, вільна енергія Гіббса, активність, метод хімічної рівноваги, закон Рауля, рівноважний вміст компонента, коефіцієнт активності.

Pismarev Konstantin, Yefimova Veronika, Smirnov Yuriy, Malii Khrystyna. Assessment of the distribution of non-metallic inclusions in steel products using the stereological reconstruction method

It is known that spinel in steels forms harmful inclusions that degrade the quality of the finished product. At the same time, to date, the mechanism of spinel formation and its stability in steel melts have not been fully elucidated, since the thermodynamic parameters of these processes have not been sufficiently studied, namely the free energies of formation and the activity of components in the range of solid solutions.

It is shown that numerous scientific studies have studied the thermodynamic equilibrium in systems where spinel is formed and have proven the stability of spinel depending on the content of oxygen, aluminum and magnesium.

Therefore, the purpose of our research was to determine the free energy of formation of magnesium and spinel at the temperatures of steelmaking processes, their activity coefficients and determine to which type of solid solutions the spinel solid solution can be attributed from the point of view of Raoult's law.

At the first stage of our research, a thermodynamic analysis of the free energy of formation of spinel and its components was carried out using the equation of the chemical reaction isotherm, which relates the activities of reactants to the equilibrium constant of the chemical process. This allowed us to establish the main equations describing the change in Gibbs energy with temperature for each substance.

Next, we conducted experimental studies using the method of establishing chemical equilibrium to determine the coefficients of spinel and its components.

In the process of determining the activity of components in the spinel phase, a solid solution of spinel with a non-stoichiometric composition was in equilibrium with liquid copper in a graphite crucible at a constant gas ratio. After establishing chemical equilibrium, the activity of the components was determined using the equations that were derived during the thermodynamic analysis.

We confirmed the formation of spinel in our experiments by X-ray diffraction and chemical analysis. The equilibrium content of aluminum and magnesium in copper was determined using inductively coupled plasma spectroscopy.

In the course of the research, the phase boundaries of the spinel solid solution were determined using the diffusion vapor method.

As a result of the work, the free energies of formation of magnesium oxide and spinel, as well as the activity of these components were determined using the chemical equilibrium method. It was found that the spinel solid solution demonstrates a negative deviation from Raoult's law.

Key words: spinel, Gibbs free energy, activity, chemical equilibrium method, Raoult's law, equilibrium content of the component, activity coefficient.

Вступ. Шпінель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) має високу температуру плавлення і утворюється як деформоване включення типу С у сталях, що містять наднизький вміст кисню. Тому дуже важливо уникнути утворення шпінелі в процесі розкислення високоякісного дроту та підшипникових сталей. При цьому механізм та фазова стійкість утворення шпінелі в рідкій сталі ще недостатньо вивчена через нестачу надійної термодинамічної інформації про її утворення.

У роботах [1-5] було досліджено термодинамічну рівновагу в системі магнію кальцію та алюмінію в рідкому залізі з точки зору стійкості фази шпінелі у розплаві сталі. Результати цих досліджень показують, що стабільність шпінелі залежить від вмісту кисню, алюмінію та магнію. Однак в цих роботах відсутні дані вільної енергії утворення шпінелі за температур сталеваріння та активностей компонентів у діапазоні твердого розчину шпінелі.

Деякі дані про вільну енергію цих систем наведено у літературі [6-10]. Однак дані цих досліджень не знаходять узгодження, оскільки більшість з них була проведена за температур нижчих ніж температури сталеплавильного виробництва. Лише у дослідженнях [5] було проведено визначення вільної енергії утворення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ за температури 1873 К з урахуванням активності MgO та Al_2O_3 у шлаках $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ за лінією ліквідусу утворення шпінелі. Фазові рівноваги в системах MgO -шпінелі, Al_2O_3 -шпінелі та системи $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ поблизу температур виробництва сталі були вивчено у роботах [10]. У дослідженнях [9] було проведено термодинамічну оцінку системи

$\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$. Показано, що шпінель має широкий діапазон вмісту твердих розчинів, від 50 до 65 мол.% Al_2O_3 , тому активність стехіометричної шпінелі, $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, повинна змінюватися як функція складу в діапазоні однорідних твердих розчинів.

Слід зауважити, що немає жодних даних про активність – склад діаграми шпінелі у діапазоні твердих розчинів. В роботах [4; 5] було зроблено припущення, що твердий розчин шпінелі є ідеальним розчином та визначено термодинамічні умови фазової стабільності шпінелі в процесі розкислення рідкої сталі, але термодинамічних характеристик шпінелі у цьому дослідженні не розглядали.

Методи та методики дослідження. З використанням методу хімічної рівноваги визначення значення вільної енергії Гіббса утворення шпінелі з простих оксидів, $\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ та зміну активностей компонентів в області гомогенного твердого розчину фази шпінелі.

Метою роботи було:

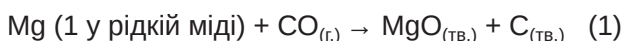
1) визначення вільної енергії утворення Mg та $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, а також активності складових частин твердого розчину шпінелі та самої шпінелі за температур стаєплавильних процесів;

2) визначення границі фаз твердого розчину шпінелі з використанням методу дифузійних пар;

Методикою досліджень був термодинамічний аналіз, метод хімічної рівноваги, а також метод дифузійних пар.

Визначення вільної енергії утворення MgO .

Для визначення вільної енергії $\Delta G_f^0 \text{MgO}$ проводились експерименти шляхом встановлення рівноваги між рідкою міддю, що містить графіт у тиглі з MgO у атмосфері $\text{Ar} - \text{CO}$. В результаті було встановлено наступну рівноважну реакцію:



Зміна вільної енергії рівняння (1) пов'язана з константою рівноваги цього процесу K_1 :

$$\Delta G_1^0 = -RT \ln K_1 = -RT \ln \frac{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{C}}}{a_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{CO}}}, \quad (2)$$

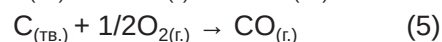
де a_{MgO} , a_{C} та a_{Mg} – активність компонентів, що приймають участь у рівноважній реакції; P_{CO} – парціальний тиск, атм; R – універсальна газова стала Дж/моль·К; T – температура, К. Оскільки активність MgO та вуглецю дорівнює одиниці, у зв'язку з використанням чистого тигля MgO та графіту, вираз для константи рівноваги може набути наступного вигляду:

$$K_1 = \frac{1}{a_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{CO}}} = \frac{1}{\gamma_{\text{Mg}} \cdot X_{\text{Mg}} \cdot P_{\text{CO}}}, \quad (3)$$

де γ_{Mg} – коефіцієнт активності магнію, X_{Mg} – масова частка магнію у рідкій міді, % відповідно.

Значення коефіцієнтів активності магнію у рідкій міді було досліджено у роботі [7]. Дані цих досліджень свідчать, що коефіцієнт активності магнію слабо залежить від температури. Звідси випливає, що при визначенні константи рівноваги процесу утворення MgO можна

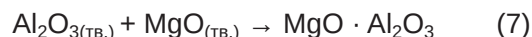
користуватися рівноважною концентрацією Mg у рідкій міді. Отже зміна вільної енергії утворення MgO можна представити наступним чином:



$$\Delta G_2^0 = -116560 - 84,8T \text{ Дж/моль}, \quad (6)$$

Визначення вільної енергії утворення $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Реакція стехіометрично утворення шпінелі з чистих оксидів має наступний вигляд:



$$\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = -RT \ln K_2 = -RT \ln \frac{a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (8)$$

В наших дослідженнях ми приймаємо стандартну активність шпінелі як її стехіометричний склад $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, тоді вираз для визначення вільної енергії Гіббса набуде вигляду:

$$\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = -RT \ln \frac{1}{a_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (9)$$

В рівняння (9) впливає, що для визначення вільної енергії утворення шпінелі необхідно визначити активності MgO та Al_2O_3 у рівновазі з чистим $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Для визначення $\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ нами було використано стехіометрично чистий $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, який знаходився у рівновазі з рідкою міддю та поміщений у графітовий тигель з фіксованим співвідношенням суміші газів $\text{Ar} - \text{CO}$.

Рівновага реакції



відбувається за умов реакції (1).

$$\Delta G_2^0 = -RT \ln K_2 = -RT \ln \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot a_{\text{C}}^3}{a_{\text{Al}}^3 \cdot P_{\text{CO}}^3}, \quad (11)$$

де a_{Al} – активність алюмінію.

Оскільки активність вуглецю дорівнює 1, оскільки використовується графітовий тигель, активність Al_2O_3 може бути виражена рівнянням:

$$a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = K_2 \cdot a_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3 = K_2 \cdot \gamma_{\text{Al}}^2 \cdot X_{\text{Al}}^2 \cdot P_{\text{CO}}^3, \quad (12)$$

де γ_{Al} – коефіцієнт активності алюмінію в розплаві міді, X_{Al} – масова частка алюмінію у розплаві.

Значення K_2 можна знайти за значеннями стандартних енергій Гіббса ΔG_2^0 з використанням таблиць термодинамічних величин. Значення активності алюмінію a_{Al} було знайдено з використанням роботи [5]. Отже активність $a_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ в стехіометричній сполуці може бути знайдена за рівноважним вмістом алюмінію у рідкій міді.

Активність MgO також можна визначити зі значення K_1 за значенням ΔG_1^0 , що визначається у відповідності рівняння (6). Отже рівняння для визначення активності MgO має наступний вигляд:

$$a_{MgO} = K_1 \cdot a_{Mg} \cdot P_{CO} \quad (13)$$

Вільна енергія рівняння (7) може бути визначена з рівняння (9) шляхом підстановки активності кожного учасника процесу.

Далі активність стехіометричної шпінелі у твердому розчині може бути отримана за наступним рівнянням:

$$a_{MgO \cdot Al_2O_3} = K_1 \cdot a_{MgO} \cdot a_{Al_2O_3} \quad (14)$$

Для виміру вільної енергії утворення MgO 5 г розплаву $Cu - 0,1$ мас% Mg завантажували у тигель з MgO , що містив циліндричний графітовий блок, в якому було просвердлено 7 чи 8 отворів для забезпечення прямого контакту газової суміші $CO - Ar$ з поверхнею розплавленої міді. При вимірюванні вільної енергії утворення шпінелі та активностей компонентів у твердому розчині шпінелі 5 г сплаву $Cu - (0,005-0,03 \text{ мас.}\%) Mg - (0,1 - 1,1 \text{ мас.}\%) Al$ завантажували у графітовий тигель з таблеткою стехіометричної шпінелі. Утворення шпінелі було підтверджено методом рентгенівської дифракції, електронно-зондовим мікроаналізатором з дисперсією довжин хвиль (EPMA) та мокрим хімічним аналізом.

Експериментальні результати вільної енергії утворення MgO наведено у Таблиці 1.

Дані таблиці свідчать, що було досягнуто умов рівноваги у нашому експерименті між CO , MgO та рідкою міддю.

Тому вільна енергія, що ілюструється рівнянням хімічної реакції (4) ΔG_f^0 може бути визначена з ΔG_1^0 та ΔG_2^0 як функція температури у Дж/моль:

$$\Delta G_1^0 = 552790 - 220,0T, \quad (15)$$

$$\Delta G_{MgO}^0 = -669350 + 135,0T, \quad (16)$$

Далі нами було визначено вільну енергію утворення $MgO \cdot Al_2O_3$. Дані наведено у Таблиці 2. Вільну енергію утворення $MgO \cdot Al_2O_3$ з окремих оксидів, $\Delta G_f^0 MgO \cdot Al_2O_3$, визначали з рівняння температурної залежності як у Дж/моль:

$$\Delta G_f^0 MgO \cdot Al_2O_3 = -20790 - 15,7T, \quad (17)$$

Відомо, що $MgO \cdot Al_2O_3$ має відносно широкий діапазон твердих розчинів за високої температури. Границі фаз твердого розчину ми визначали з використанням методу дифузійних пар. Встановлено діапазон існування твердих розчинів шпінелі від 48,4 до 57,5 моль% Al_2O_3 за 1700 К та від 46, до 64,2 моль% Al_2O_3 за 1900 К відповідно.

Далі нами було визначено активність MgO та Al_2O_3 у всьому діапазоні складу твердого розчину шпінелі за 1800 та 1873 К. Дані досліджень наведено у Таблиці 3.

Таблиця 1

Експериментальні результати вільної енергії утворення MgO

N	T, K	P_{CO} , атм	$X_{MgO} \times 10^4$, долі 1	$a_{MgO} \times 10^6$	ΔG_1^0 , кДж/моль
1	1700	0,516	1,22	8,411	- 174,52
2	1700	0,367	1,41	9,710	- 177,31
3	1700	0,247	2,05	1,407	- 177,68
4	1700	0,296	1,28	8,813	- 181,74
5	1800	0,984	2,74	2,184	- 160,85
6	1600	0,098	3,95	2,293	- 203,59
7	1700	0,975	7,23	4,996	- 172,97
8	1750	0,990	1,09	8,032	- 170,84

Таблиця 2

Експериментальні результати вільної енергії утворення $MgO \cdot Al_2O_3$

N	T, K	P_{CO} , атм	X_{Al} у міді $\times 10^3$, долі 1	X_{Mg} у міді $\times 10^3$, долі 1	$a_{Al_2O_3}$	a_{MgO}	$\Delta G_f^0 MgO \cdot Al_2O_3$, кДж/моль
1	1700	0,250	3,4	2,34	0,422	0,124	- 41,68
2	1651	0,100	4,5	1,31	0,519	0,079	- 43,91
3	1850	0,970	9,5	1,03	0,248	0,111	- 55,35
4	1850	0,990	9,8	1,38	0,296	0,154	- 47,52
5	1749	0,200	14,2	6,05	0,448	0,092	- 46,34
6	1798	0,700	7,1	5,1	0,472	0,105	- 44,86
7	1798	0,500	1,13	4,76	0,474	0,070	- 50,86

Таблиця 3

Експериментальні результати активностей компонентів у твердому розчині шпінелі

N	T, K	P _{со} , атм	Фаза рідкої міді		Фаза шпінелі			
			X _{Al₂O₃} , долі 1	X _{Mg} ×10 ⁴ , долі 1	X _{Al₂O₃}	a _{Al₂O₃}	a _{MgO}	a _{MgO·Al₂O₃}
1	1800	0,811	0,0016	3,99	47,3	0,032	0,917	0,781
2	1801	0,383	0,0131	1,03	48,0	0,257	0,109	0,745
3	1801	0,398	0,0132	6,90	48,1	0,293	0,076	0,592
4	1802	0,516	0,0111	6,50	50,0	0,416	0,091	1,006
5	1798	0,499	0,0134	3,55	52,5	0,682	0,052	0,942
6	1799	0,503	0,0144	2,75	54,8	0,786	0,040	0,832
7	1801	0,340	0,0258	2,45	57,3	0,884	0,023	0,541
8	1800	0,287	0,0327	2,34	61,1	1,020	0,019	0,513
9	1873	0,993	0,0056	12,9	47,0	0,034	0,954	0,810
10	1874	0,986	0,0136	2,52	47,9	0,218	0,181	0,989
11	1871	0,988	0,0220	6,34	53,8	0,754	0,048	0,910
12	1874	0,986	0,0244	4,77	57,3	0,852	0,034	0,731
13	1875	0,992	0,0256	4,10	58,5	0,937	0,029	0,682
14	1873	0,990	0,0254	2,57	63,4	0,991	0,019	0,468

Активності MgO та Al₂O₃ для кожної границі насиченням дорівнювали одиниці. Активність стехіометричної шпінелі MgO·Al₂O₃ у твердому розчині було визначено за активностями MgO та Al₂O₃ та $\Delta G_f^0 \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Активність MgO·Al₂O₃ було розраховано з використанням рівнянь (18) та (19) де псевдо-бінарні суміші MgO – MgO·Al₂O₃ та MgO·Al₂O₃ – Al₂O₃ вважалися ідеальними розчинами.

$$a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{X_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{1 - X_{\text{Al}_2\text{O}_3}} (\text{MgO} - \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3), \quad (18)$$

$$a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{1 - X_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{X_{\text{Al}_2\text{O}_3}} (\text{MgO} - \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3), \quad (19)$$

Розрахунками показано, що розчин стехіометричної шпінелі MgO·Al₂O₃ демонструє від'ємне відхилення від закону Рауля.

Висновки і пропозиції. В результаті проведених досліджень визначено вільні енергії утворення MgO та MgO·Al₂O₃, а також активності компонентів у твердому розчині шпінелі методом хімічної рівноваги.

Встановлено:

1) рівняння для визначення вільної енергії утворення MgO та MgO·Al₂O₃;

2) показано, що твердий розчин MgO·Al₂O₃ демонструє від'ємне відхилення від закону Рауля;

3) визначено коефіцієнт активності MgO·Al₂O₃ при насичених MgO та Al₂O₃.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Park J., Zhang L. Kinetic Modeling of Nonmetallic Inclusions Behavior in Molten Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2021. Vol. 51 (6). pp. 2453-2482. DOI: 10.1007/s11663-020-01954-1
2. Sajjad M., Dekang R., Hongyu Z., Xin T. Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel-slag interface using water modeling under static and dynamic conditions. *Archives of Advanced Engineering Science*. 2025. Vol. 3(3). pp. 197-204. DOI: 10.47852/bonviewAAES52024058
3. Wang Q., Zhang Y., Zheng Y., Wang J., Guo Z., Wu X., Zhang Q., Zhu L. Formation and high-temperature stability Mg-doped titanium nitrides in Mg – Ti treated steel: Experiment and first-principles calculation. *Materials Characterization*. 2026. Vol. 232. pp. 234-241. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115954
4. Liu Y., Cheng S., Liu T. Study of inclusions-removal and slag-metal dispersion phenomenon in gas-stirred ladle. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 2024. Vol. 22(7). pp. 843–853. DOI: 10.1515/ijcre-2024-0090
5. Nishibata H., Miyatake T., Matsuda Y., Uddin M. A., Kato Y., Harada A. Effect of wettability, number of liquid phases, and agitation procedure on agglomeration/breakup/transfer of fine particles in liquid. *Steel Research International*. 2024. Vol. 95(1). 2300331. DOI: 10.1002/srin.202300331
6. Zhu Y. L., Cui H. N., Li T., Tan M., Tang G. Z., Xin Z. Y., Xiao, T. T. Study on the motion behavior of inclusion clusters at the steel–slag interface. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023. Vol. 54. pp. 101–114.
7. Zhu Y. L., Li T., Tang G. Z., Gu Y. J., Cui H. N. Water model study on the flotation behaviors of inclusion clusters in molten steel. *ISIJ International*. 2022. Vol.62(7). pp. 1408–1417. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2021-551

8. Zhou Y. L., Deng Z. Y., & Zhu, M. Y. Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel-slag interface using water modeling. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2017. Vol.24. pp. 627–637. DOI: 10.1007/s12613-017-1445-y
9. Xuan C. J., Mu, W. Z. Dissolution kinetics of arbitrarily-shaped alumina in oxide melt: An integration of phase-field modelling and real-time observation study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol.834. 155168. DOI:10.1016/j.jallcom.2020.155168
10. Xuan C. J., Mu W. Z. A mechanism theory of dissolution profile of oxide particles in oxide melt. *Journal of the American Ceramic Society*. 2021. Vol. 104(1). pp. 57–75. DOI: 10.1111/jace.17435

REFERENCES:

1. Park J., Zhang L. (2020). Kinetic Modeling of Nonmetallic Inclusions Behavior in Molten Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions*. Vol. 51 (6). pp. 2453-2482. DOI: 10.1007/s11663-020-01954-1
2. Sajjad M., Dekang R., Hongyu Z., Xin T. (2025). Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel-slag interface using water modeling under static and dynamic conditions. *Archives of Advanced Engineering Science*. Vol. 3(3). pp. 197-204. DOI: 10.47852/bonviewAAES52024058
3. Wang Q., Zhang Y., Zheng Y., Wang J., Guo Z., Wu X, Zhang Q., Zhu L. (2026) Formation and high-temperature stability Mg-doped titanium nitrides in Mg – Ti treated steel: Experiment and first-principles calculation. *Materials Characterization*. Vol. 232. pp. 234-241. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115954
4. Liu Y., Cheng S., & Liu T. (2024). Study of inclusions-removal and slag-metal dispersion phenomenon in gas-stirred ladle. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. Vol. 22(7). pp. 843–853. DOI: 10.1515/ijcre-2024-0090
5. Nishibata H., Miyatake T., Matsuda Y., Uddin M. A., Kato Y., Harada A. (2024). Effect of wettability, number of liquid phases, and agitation procedure on agglomeration/breakup/transfer of fine particles in liquid. *Steel Research International*. Vol. 95(1). 2300331. DOI: 10.1002/srin.202300331
6. Zhu Y. L., Cui H. N., Li T., Tan M., Tang G. Z., Xin Z. Y., Xiao, T. T. (2023). Study on the motion behavior of inclusion clusters at the steel-slag interface. *Metallurgical and Materials Transactions B*. Vol. 54. pp. 101–114.
7. Zhu Y. L., Li T., Tang G. Z., Gu Y. J., Cui H. N. (2022). Water model study on the flotation behaviors of inclusion clusters in molten steel. *ISIJ International*. Vol.62(7). pp. 1408–1417. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2021-551
8. Zhou Y. L., Deng Z. Y., & Zhu, M. Y. (2017). Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel-slag interface using water modeling. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. Vol.24. pp. 627–637. DOI: 10.1007/s12613-017-1445-y
9. Xuan C. J., Mu, W. Z. (2020). Dissolution kinetics of arbitrarily-shaped alumina in oxide melt: An integration of phase-field modelling and real-time observation study. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol.834. 155168. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.155168
10. Xuan C. J., Mu W. Z. (2021). A mechanism theory of dissolution profile of oxide particles in oxide melt. *Journal of the American Ceramic Society*. Vol. 104(1). pp. 57–75. DOI: 10.1111/jace.17435



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 621.771.23:620.179:621.89:519.876

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-16>

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕНЕСЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ З УРАХУВАННЯМ ВІДНОСНОГО НАПРАЦЮВАННЯ РОБОЧИХ ВАЛКІВ ТА ВПЛИВУ РІЗНИХ ПРОКАТНИХ ЕМУЛЬСІЙ

Спічак Олександр Юрійович,

аспірант кафедри металургії та інноваційних технологій

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»;

начальник відділу холодного прокату технічного управління

Публічного акціонерного товариства «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь»

ORCID ID: 0009-0004-9653-437X

У статті розглядається актуальна проблема кількісного оцінювання формування мікрорельєфу поверхні сталевих штаб у процесі холодної прокатки на безперервних тандем-станах. Встановлено, що ключовими чинниками, які визначають шорсткість готового прокату, є стан поверхні робочих валків останньої кліти та трибологічні умови, що задаються типом прокатної емульсії. Оскільки експериментальний контроль проміжної шорсткості в промислових умовах є обмеженим, авторами запропоновано універсальний підхід до оцінювання коефіцієнта перенесення (відбиття) шорсткості K_{print} . Методологія дослідження ґрунтується на введенні параметра відносного напрацювання валків L , що дозволяє уніфікувати дані для кампаній різної тривалості. Проведено порівняльний аналіз п'яти типів прокатних емульсолів: базового «Універсал-1ТС-М» та чотирьох імпортованих аналогів (Lubro, Quakerol, Rollub, Trenoil). Для базового процесу побудовано еталонні лінійні залежності зносу валків та зміни шорсткості штаби. Наукова новизна роботи полягає у визначенні K_{print} не як статичної величини, а як динамічної функції відносного ресурсу валків. Порівняно три методи розрахунку: середньоарифметичний, інтегральний миттєвий та відношення інтегралів функцій («енергетична» міра). Результати показали, що інтегральні методи забезпечують більш згладжену оцінку, нівелюючи локальні неоднорідності, хоча й дають значення на 15–30% нижчі за дискретні заміри. Ранжування емульсолів за здатністю до перенесення шорсткості виявилось ідентичним для всіх методів, що підтверджує надійність запропонованих моделей. Отримані функціональні залежності можуть бути інтегровані в математичні моделі формування масляної плівки для оптимізації режимів прокатки та покращення якості поверхні металу.

Ключові слова: холодна прокатка, тандем-стан, шорсткість поверхні, робочі валки, прокатна емульсія, коефіцієнт перенесення шорсткості, відносне напрацювання валків, мікрорельєф.

Spichak Oleksandr. Determination of the roughness imprint coefficient in cold rolling with consideration of the relative work roll service life and the influence of different rolling emulsions

This article examines the topical issue of quantitatively assessing the formation of the surface micro-relief of steel strip during cold rolling on continuous tandem mills. It has been established that the key factors determining the roughness of the finished rolled product are the surface condition of the work rolls in the final stand and the tribological conditions determined by the type of rolling emulsion. Since experimental control of intermediate roughness under industrial conditions is limited, the authors propose a universal approach to assessing the roughness imprint coefficient K_{print} . The research methodology is based on the introduction of the relative roll operating time parameter L , which allows data to be standardised across campaigns of varying durations. A comparative analysis was carried out of five types of rolling emulsions: the base 'Universal-1TS-M' and four imported equivalents (Lubro, Quakerol, Rollub, Trenoil). For the base process, reference linear relationships were established between roll wear and changes in strip roughness. The scientific novelty of the work lies in defining K_{print} not as a static quantity, but as a dynamic function of the relative service life of the rolls. Three calculation methods were compared: the arithmetic mean, the instantaneous integral, and the ratio of integrals of functions ('energy' measure). The results showed that integral methods provide a smoother estimate, levelling out local inhomogeneities, although they yield values 15–30% lower than discrete measurements. The ranking of emulsions by their ability to imprint roughness proved to be identical for all methods, confirming the reliability of the proposed models. The obtained functional dependencies can be integrated into mathematical models of lubricant film formation to optimise rolling conditions and improve metal surface quality.

Key words: cold rolling, tandem mill, surface roughness, work rolls, rolling emulsion, roughness transfer coefficient, relative roll wear, micro-relief.

Вступ. У процесі холодної прокатки на безперервному чотирикільтовому тандем-стані шорсткість поверхні штаби визначається мікрорельєфом робочих валків, умовами тертя в осередку деформації [1–4] та властивостями

прокатної емульсії [5–8]. Вплив вихідної шорсткості штаби практично нівелюється у перших трьох клітках [9–12], унаслідок чого формування кінцевої поверхні холоднокатаного прокату визначається параметрами деформації та

мікрорельєфом робочих валків четвертої кліті. Через відсутність можливості контролю проміжної шорсткості штаби експериментально доступними є лише шорсткість валків та кінцева шорсткість штаби після четвертої кліті.

У промислових умовах дані щодо зміни шорсткості робочих валків упродовж кампанії їх роботи є обмеженими та, як правило, доступні лише на початку і в кінці кампанії, за різної її тривалості для різних прокатних емульсій.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення універсального підходу до кількісного оцінювання ступеня перенесення мікрорельєфу робочих валків на поверхню прокату та отримання функціональних залежностей, що дозволяють визначати шорсткість робочих валків четвертої кліті на різних етапах кампанії прокатки за умов обмеженої експериментальної інформації.

Метою дослідження є визначення коефіцієнта перенесення шорсткості як функції відносного напрацювання робочих валків для різних прокатних емульсій та отримання функціональних залежностей для визначення шорсткості робочих валків упродовж кампанії прокатки з метою їх використання в математичних моделях формування мастильної плівки.

Методи та методики дослідження. Інформаційною основою визначення коефіцієнту перенесення (відбиття) K_{print} є результати промислового контролю шорсткості Ra (мкм) поверхні робочих валків (індекс “r”) четвертої кліті та шорсткості поверхні штаби (індекс “s”) після прокатки на 4-клітьовому стані тандем 1680 при використанні різних емульсолів. Для емульсолу «Універсал-1ТС-М» проводили спеціальні промислові дослідження з періодичними зупинками прокатного стану для замірювання показників шорсткості, що дозволило отримати в табличному вигляді функціональну залежність зміни шорсткості робочих валків четвертої кліті та кінцевої шорсткості штаби упродовж усієї кампанії їх роботи. Цей емульсол прийнято як базовий ($j = 0$) і використано для формування еталонної залежності. Для інших емульсолів ($j = 1, \dots, m$; для даного дослідження $n = 4$, табл. 1) експериментальні дані є обмеженими та включають лише значення шорсткості робочих валків і кінцевої шорсткості штаби на початку та в кінці кампанії, без проміжних вимірювань, за різної її тривалості. Зазначені дані використовували для подальшого порівняльного аналізу на основі еталонної залежності.

Для усунення впливу локальних неоднорідностей мікрорельєфу результати вимірювань шорсткості поверхонь робочих валків четвертої кліті та штаби після прокатки приводили до усереднених значень.

Шорсткість верхнього (“top”) і нижнього (“bot”) валків четвертої кліті визначали як: $Ra_{r,top} = \frac{1}{nr} \sum_{k=1}^{nr} Ra_{r,top,k}$ та $Ra_{r,bot} = \frac{1}{nr} \sum_{k=1}^{nr} Ra_{r,bot,k}$, де k – номер контрольного вимірювання в межах кампанії. Усереднена шорсткість валків: $Ra_{r,m} = (Ra_{r,top} + Ra_{r,bot}) / 2$. Аналогічно для штаби після четвертої кліті: $Ra_{s,top} = \frac{1}{ns} \sum_{k=1}^{ns} Ra_{s,top,k}$, $Ra_{s,bot} = \frac{1}{ns} \sum_{k=1}^{ns} Ra_{s,bot,k}$. Усереднена шорсткість штаби: $Ra_{s,m} = (Ra_{s,top} + Ra_{s,bot}) / 2$. Усереднення дозволяє зменшити вплив локальних неоднорідностей мікрорельєфу та забезпечити порівнянність результатів для різних кампаній прокатки.

З огляду на різну тривалість кампаній роботи валків для різних прокатних емульсолів, для уніфікації подальшого аналізу введено відносне напрацювання валків:

$$s = L / L_{max}, 0 \leq s \leq 1, \quad (1)$$

де L_{max} – поточне та максимальне напрацювання валків у відповідній кампанії.

Для емульсолу «Універсал-1ТС», для якого експериментальні дані охоплюють усю кампанію роботи валків, за табличними значеннями будували залежності шорсткості робочих валків четвертої кліті $Ra_{r,top(j=0)}(s)$, $Ra_{r,bot(j=0)}(s)$ та кінцевої шорсткості штаби $Ra_{s,top(j=0)}(s)$, $Ra_{s,bot(j=0)}(s)$ від відносного напрацювання $s \in [0;1]$. На їх основі визначали коефіцієнт перенесення:

$$K_{print,top(j=0)} = Ra_{s,top(j=0)}(s) / Ra_{r,top(j=0)}(s), \quad (2a)$$

$$K_{print,bot(j=0)} = Ra_{s,bot(j=0)}(s) / Ra_{r,bot(j=0)}(s). \quad (2b)$$

$$K_{print(j=0)} = (K_{print,top(j=0)} + K_{print,bot(j=0)}) / 2 \quad (2в)$$

Безрозмірну форму еволюції шорсткості робочих валків визначали як

$$\phi_{r,top(j=0)}(s) = \frac{Ra_{r,top(j=0)}(s) - Ra_{r,top(j=0)}(0)}{Ra_{r,top(j=0)}(1) - Ra_{r,top(j=0)}(0)}, \quad \phi_{r,top}(0) = 0, \quad \phi_{r,top}(1) = 1. \quad (3)$$

$$\phi_{r,bot(j=0)}(s) = \frac{Ra_{r,bot(j=0)}(s) - Ra_{r,bot(j=0)}(0)}{Ra_{r,bot(j=0)}(1) - Ra_{r,bot(j=0)}(0)}, \quad \phi_{r,bot}(0) = 0, \quad \phi_{r,bot}(1) = 1 \quad (4)$$

Функції $\phi_{r,top}(s)$ та $\phi_{r,bot}(s)$ описують хід зміни шорсткості верхнього та нижнього валків упродовж кампанії незалежно від її абсолютної тривалості та рівня шорсткості.

Таблиця 1

Експериментальні емульсоли при дослідженні K_{print} та присвоєні індекси

Емульсол	Універсал-1ТС-М (базовий)	Lubro DL ZPS	Quakerol Zap 4.0	ROLLUB 988-AR	TRENOIL S740
Індекс j	0	1	2	3	4

Аналогічно безрозмірну форму еволюції кінцевої шорсткості штаби визначали як

$$\phi_{s,top}(s) = \frac{Ra_{s,top(j=0)}(s) - Ra_{s,top(j=0)}(0)}{Ra_{s,top(j=0)}(1) - Ra_{s,top(j=0)}(0)},$$

$$\phi_{s,top}(0) = 0, \quad \phi_{s,top}(1) = 1. \quad (5)$$

$$\phi_{s,bot}(s) = \frac{Ra_{s,bot(j=0)}(s) - Ra_{s,bot(j=0)}(0)}{Ra_{s,bot(j=0)}(1) - Ra_{s,bot(j=0)}(0)},$$

$$\phi_{s,bot}(0) = 0, \quad \phi_{s,bot}(1) = 1. \quad (6)$$

У разі лінійної зміни шорсткості штаби форми $\phi_{s,top}(s)$ та $\phi_{s,bot}(s)$ можуть бути прийняті як $\phi_{s,top}(s) = s$ та $\phi_{s,bot}(s) = s$.

Для верхнього та нижнього робочих валків четвертої кліти приймаємо, що залежності шорсткості від відносного ресурсу кампанії описуються лінійними функціями:

$$Ra_{r,top(j)}(s) = A_{r,top(j)}s + B_{r,top(j)},$$

$$Ra_{r,bot(j)}(s) = A_{r,bot(j)}s + B_{r,bot(j)}, \quad (7)$$

де коефіцієнти $A_{r,top(j)}$, $B_{r,top(j)}$, $A_{r,bot(j)}$, $B_{r,bot(j)}$ визначаються за експериментальними даними для відповідного емульсолу.

Перехід до визначення шорсткості валків в довільний момент кампанії здійснюється на основі того, що для процесу j відома початкова шорсткість робочих валків при завалці при $s = 0$: $Ra_{r,top(j)}(0)$, $Ra_{r,bot(j)}(0)$.

Через прийняту лінійність функції зносу зміна шорсткості по шляху роботи валків s є лінійною. Допускали, що форма залежності зміни шорсткості валків для всіх процесів j подібна. В такому разі, нахили кривих зміни шорсткості валків (тобто коефіцієнти для процесу $A_{r,top(j)}$ та $A_{r,bot(j)}$) дорівнюють нахилам базового процесу. Тобто залежності (7) переходять в розрахункові при:

$$A_{r,top(j)} = A_{r,top(j=0)}, \quad A_{r,bot(j)} = A_{r,bot(j=0)},$$

$$B_{r,top(j)} = Ra_{r,top(j)}(0), \quad B_{r,bot(j)} = Ra_{r,bot(j)}(0). \quad (8)$$

Це дозволяє визначити шорсткість валків для довільного шляху роботи s .

Функції шорсткості штаби від абсолютних (L) та, після переходу за формулою (1), відносних (s) ресурсів кампанії для різних емульсолів отримували шляхом обробки графічних залежностей, що будували за експериментальними даними:

$$Ra_{s,top(j)}(L) = A_{s,top(j)}L - B_{s,top(j)},$$

$$Ra_{s,bot(j)}(L) = A_{s,bot(j)}L - B_{s,bot(j)}, \quad (9)$$

$$Ra_{s,top(j)}(s) = A_{s,top(j)}s - B_{s,top(j)},$$

$$Ra_{s,bot(j)}(s) = A_{s,bot(j)}s - B_{s,bot(j)}. \quad (9a)$$

$$Ra_{s,m(j)}(L) = Ra_{s,m(j)}(s) = Ra_{s,top(j)} + Ra_{s,bot(j)} \quad (10)$$

Коефіцієнт перенесення шорсткості визначали як відношення відповідних функцій шорсткості штаби та робочих валків:

$$K_{print,top(j)} = Ra_{s,top(j)}(s) / Ra_{r,top(j)}(s),$$

$$K_{print,bot(j)} = Ra_{s,bot(j)}(s) / Ra_{r,bot(j)}(s). \quad (11)$$

Таким чином, коефіцієнт перенесення є функцією відносного ресурсу кампанії та визначається безпосередньо через експериментально встановлені залежності шорсткості для конкретного емульсолу.

Визначення коефіцієнту перенесення може бути отримано двома методами: 1) як середньоарифметичне значення, шляхом обробки таблиць з даними експерименту; 2) як інтегральний показник.

– За методом 1. Для набору N експериментальних точок:

$$K_{print,top,MA(j)} = (1/N) \sum_{k=1}^N K_{print,top(j)}(s_k), \quad (12a)$$

$$K_{print,bot,MA(j)} = (1/N) \sum_{k=1}^N K_{print,bot(j)}(s_k), \quad (12b)$$

$$K_{print,AV(j)} = (K_{print,top,MA(j)} + K_{print,bot,MA(j)}) / 2. \quad (12в)$$

– За методом 2. Через інтеграли функцій:

2А) середнє значення миттєвого коефіцієнту (інтеграл від відношення):

$$K_{print,top,I(j)} = \int_0^1 \frac{Ra_{s,top(j)}(s)}{Ra_{r,top(j)}(s)} ds, \quad (13a)$$

$$K_{print,bot,I(j)} = \int_0^1 \frac{Ra_{s,bot(j)}(s)}{Ra_{r,bot(j)}(s)} ds, \quad (13b)$$

$$K_{print,I(j)} = (K_{print,top,I(j)} + K_{print,bot,I(j)}) / 2. \quad (13в)$$

2Б) відношення інтегралів (інтегральна “енергетична/масова” міра):

$$K_{print,top,R(j)} = \frac{\int_0^1 Ra_{s,top(j)}(s) ds}{\int_0^1 Ra_{r,top(j)}(s) ds}, \quad (14a)$$

$$K_{print,bot,R(j)} = \frac{\int_0^1 Ra_{s,bot(j)}(s) ds}{\int_0^1 Ra_{r,bot(j)}(s) ds}, \quad (14b)$$

$$K_{print,R(j)} = (K_{print,top,R(j)} + K_{print,bot,R(j)}) / 2. \quad (14в)$$

Результати та дискусії. Для базового емульсолу за кампанію роботи валків отримали масив значень шорсткості валків та штаби (табл. 2).

На основі обробки даних табл. 2 отримали:

– верх: $Ra_{r,top(j=0)}(s) = -2,27s + 6,33$;

$$Ra_{s,top(j=0)}(s) = -0,502s + 1,68, \quad (15a)$$

– низ: $Ra_{r,bot(j=0)}(s) = -4,76s + 7,50$;

$$Ra_{s,bot(j=0)}(s) = -0,991s + 1,81, \quad (15б)$$

– середні: $Ra_{r.m(j=0)}(s) = -3,515s + 6,915$;

$$Ra_{s.m(j=0)}(s) = -0,7465s + 1,745. \quad (15b)$$

За рядками табл. 2 із використанням формул (2а) та (2б) обчислювали поточні коефіцієнти перенесення.

Для інших прокатних емульсолів експериментально зафіксовано зміну середньої шорсткості поверхні штаби після четвертої кліти залежно від напрацювання валків L (км). Експериментальні графіки залежностей $Ra_s(L)$ для верхньої та нижньої поверхонь штаби подано на рис. 1–4.

Після нормування змінної в лінійній залежності (9а) та (9б) вони були зведені до вигляду $Ra_{s.m}(L) = AL_{max}s + B$ та наведені в табл. 3.

Таблиця 2

Розрахунок $K_{print(j=0)}$ для емульсолу «Універсал-1ТС»

Сторона	Шорсткість валків	Шорсткість штаби	Коефіцієнт перенесення
верх	6,33	1,68	0,265
низ	7,5	1,81	0,241
верх	4,038	1,32	0,327
низ	3,832	1,54	0,402
верх	3,4	1,13	0,332
низ	3,4	0,87	0,256
верх	3,415	1,12	0,328
низ	3,405	1,15	0,338
верх	3,41	1,53	0,449
низ	3,3	1,01	0,306
верх	5,6	1,9	0,339
низ	5,47	2,3	0,420
верх	2,36	1,07	0,453
низ	2,52	0,925	0,367
верх	5,48	0,996	0,182
низ	5,94	0,787	0,132
верх	4,06	1,178	0,290
низ	2,74	0,819	0,299
Середнє:			$K_{print(j=0)} = 0,323$

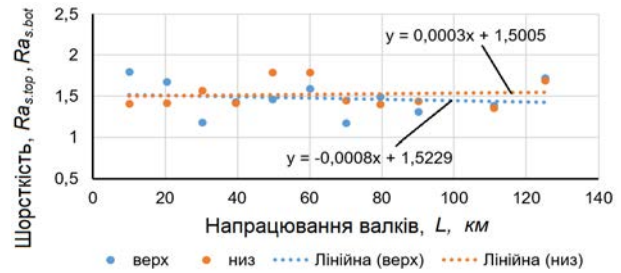


Рис. 1. Залежність шорсткості верху $Ra_{s.top}$ та низу $Ra_{s.bot}$ штаби від напрацювання валків L при роботі на емульсолі «Lubro DL ZPS»

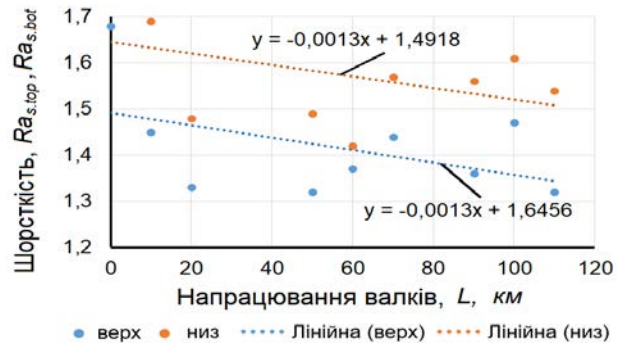


Рис. 2. Залежність шорсткості верху $Ra_{s.top}$ та низу $Ra_{s.bot}$ штаби від напрацювання валків L при роботі на емульсолі «Quakerol Zap 4,0»

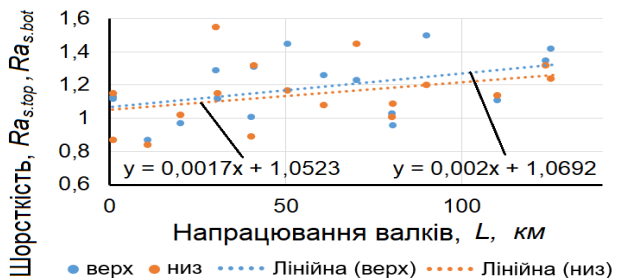


Рис. 3. Залежність шорсткості верху $Ra_{s.top}$ та низу $Ra_{s.bot}$ штаби від напрацювання валків L при роботі на емульсолі ROLLUB 988-AR

Таблиця 3

Лінійні залежності шорсткості штаби після прокатки від відносного ресурсу кампанії s

j	Емульсол	Сторона	$Ra_s(s)$, мкм	L_{max} , км
1	Lubro DL ZPS	верх	$Ra_{s.top}(s) = 0,0008L_{max}s + 1,5229$	125,2
		низ	$Ra_{s.bot}(s) = 0,0003L_{max}s + 1,5005229$	125,2
2	Quakerol Zap 4.0	верх	$Ra_{s.top}(s) = -0,0013L_{max}s + 1,4918$	110
		низ	$Ra_{s.bot}(s) = -0,0013L_{max}s + 1,6456$	110
3	ROLLUB 988-AR	верх	$Ra_{s.top}(s) = 0,0020L_{max}s + 1,0692$	127,5
		низ	$Ra_{s.bot}(s) = 0,0017L_{max}s + 1,0523$	127,5
4	TRENOIL S740	верх	$Ra_{s.top}(s) = -0,0047L_{max}s + 1,5776$	126,2
		низ	$Ra_{s.bot}(s) = -0,0038L_{max}s + 1,3962$	126,2

Таблиця 4

Зведені значення коефіцієнта перенесення шорсткості K_{print} , визначені різними методами, та їх відхилення від середньоарифметичного

j	Емульсол	Сторона	Метод 1	Метод 2А		Метод 2Б	
			$K_{print.MA}$	$K_{print.I}$	$\Delta_I, \%$	$K_{print.R}$	$\Delta_R, \%$
0	Універсал-1ТС (базовий)	верх	0,339	0,327	-3,5	0,32	-5,6
		низ	0,332	0,318	-4,2	0,312	-6,0
		середнє	0,323	0,323	0,0	0,317	-1,9
1	LUBRO DL ZPS	верх	0,421	0,319	-24,2	0,305	-27,6
		низ	0,441	0,307	-30,4	0,295	-33,1
		середнє	0,431	0,313	-27,4	0,300	-30,4
2	QUAKEROL Zap 4.0	верх	0,351	0,285	-18,8	0,275	-21,6
		низ	0,411	0,316	-23,1	0,305	-25,8
		середнє	0,381	0,301	-21,0	0,290	-23,9
3	ROLLUB 988-AR	верх	0,289	0,245	-15,2	0,232	-19,7
		низ	0,276	0,237	-14,1	0,225	-18,5
		середнє	0,283	0,241	-14,8	0,229	-19,1
4	TRENOIL S740	верх	0,305	0,252	-17,4	0,248	-18,7
		низ	0,292	0,228	-21,9	0,224	-23,3
		середнє	0,299	0,240	-19,7	0,236	-21,1

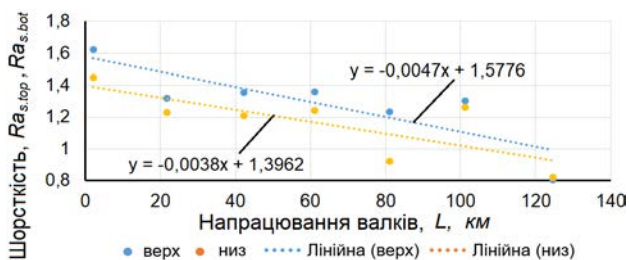


Рис. 4. Залежність шорсткості верху $Ra_{s.top}$ та низу $Ra_{s.bot}$ штаби від напрацювання валків L при роботі на емульсолі TRENOIL S740

На основі експериментальних даних, наведених у табл. 2 та табл. 3, а також кампанійних залежностей шорсткості поверхні штаби, представлених на рис. 1–4, виконували розрахунки коефіцієнтів перенесення шорсткості K_{print} для базового та досліджуваних прокатних емульсолів. Оцінювання K_{print} здійснювали прийнятими методами: а) як середньоарифметичне значення за дискретними експериментальними точками, за формулами (2а)–(2в); б) як інтеграл від функції $K_{print}(s)$ за відносним ресурсом кампанії, тобто за формулами (3а)–(3в) (метод 2А); в) як відношення інтегралів кампанійних функцій шорсткості штаби та еталонної функції шорсткості валків, тобто за формулами (4а)–(4в) (метод 2Б). Результати розрахунку наведені в табл. 4.

Як видно з табл. 4, для базового (еталонного) емульсолу значення коефіцієнта перенесення, визначені різними методами, практично збігаються, що підтверджує узгодженість

експериментальних даних і коректність лінійної кампанійної моделі. Для інших емульсолів інтегральні методи (2А, 2Б) дають нижчі значення K_{print} порівняно з середньоарифметичним методом (1) з відхиленням до 15–30%, що зумовлено згладжуванням локальних піків шорсткості при переході до інтегральної оцінки. Ранжування емульсолів за величиною K_{print} є однаковим для всіх методів, що обґрунтовує застосування інтегральних показників для порівняльної оцінки впливу прокатних емульсолів.

Висновки. Удосконалено методологію визначення коефіцієнта перенесення мікрорельєфу робочих валків на поверхню штаби під час холодної прокатки, у якій коефіцієнт K_{print} розглядається не як стала величина, а як функція відносного напрацювання валків і типу прокатного емульсолу. Методологія включає нормування ресурсу валків, побудову еталонних залежностей для базового емульсолу та поширення їх на інші емульсоли за початковими і кінцевими значеннями шорсткості, що дозволило уточнити закономірності перенесення мікрорельєфу контактуючих поверхонь і використання K_{print} у моделях формування масильної плівки за обмежених виробничих даних.

Отримані математичні залежності зміни шорсткості валків від відносного напрацювання дозволяють прогнозувати стан поверхні прокату в будь-який момент кампанії. Це створює підґрунтя для розроблення адаптивних систем керування режимами обтиснень у чистових клітках тандем-стану з метою забезпечення заданого стандарту шорсткості готової продукції при переході на нові типи технологічних мастил.

ЛІТЕРАТУРА:

- 1 B. Ma, A.K. Tieu, C. Lu, Z. Jiang. An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 125–126, P.657-663. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00377-1).
- 2 R. Ahmed , M.P.F Sutcliffe. Identification of surface features on cold-rolled stainless steel strip. *Wear*. 2000. Vol. 244, Issues 1–2, P. 60-70. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00442-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00442-7).
- 3 John G. Lenard. The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 152, Issue 2, P. 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.026>.
4. Sören Andersson, Edwin Salas-Russo. The influence of surface roughness and oil viscosity on the transition in mixed lubricated sliding steel contacts. *Wear*. 1994. Vol.174, Issues 1–2, P. 71-79.
5. Kukhar V., Spichak O., Pashynskiy V., Malii K., Balalayeva E., Marchenko I., Tuzenko O. A data-driven approach to the selection of sustainable emulsions for cold-rolled steel production. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. 2025. Vol. 23. Issue 2. P. 5–16. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15862796>.
6. Спічак О. Ю., Кухар В. В., Широкобоков В. В. Вплив параметрів відпалу у ковпачових печах на чистоту поверхні холоднокатаного прокату. *International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings* (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. P. 186–189. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-65>.
7. Кухар В. В., Спічак О. Ю., Пашинський В. В., Малій Х. В. Випробування емульсолів для холодної прокатки на сажотворення при відпалі рулонів. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1(53). С. 116–128. DOI: [10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)116](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)116).
8. Кухар В. В., Спічак О. Ю., Балалаєва О. Ю., Марченко І. Ф. Розробка математичних моделей змін концентрації емульсій та вмісту механічних домішок у технологічних рідинах з використанням пакету MATLAB для обробки експериментальних даних. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2024. Вип. 49. Т. 1. С. 100–109. DOI: [10.31498/2225-6733.49.1.2024.321216](https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321216).
9. Kijima H. Influence of roll radius on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214, Issue 5. P. 1111–1119. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2013.12.019](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.019).
10. Miranda A. C. M., Neto C. L., Labiapari W. da S., Pereira P. H. R., Cetlin P. R., Arias A. R. Study of the coefficient of friction and forward slip in cold rolling of stainless steel AISI 430 in Sendzimir mills. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 34. P. 912-923. DOI: [10.1016/j.jmrt.2024.12.106](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.106).
11. Çolak B., Ahmed Z., Özakin B., Kurgan N. An experimental investigation into roughness transfer in asymmetrical rolling of steel strips. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*. 2023. Vol. 13, No. 3. P. 1070–1089. DOI: [10.31466/kfbd.1289221](https://doi.org/10.31466/kfbd.1289221).
12. Cavallari M., Gaboardi P., McWhirter R., Perassolo M., Trevisan C. New surface finishes for cold rolling mills. *Proceedings of the 2nd ESTAD Conference (METEC 2015)*. Düsseldorf, Germany, June 15–19, 2015. Düsseldorf, 2015. P. 1–6.

REFERENCES:

1. Ma, B., Tieu, A. K., Lu, C., & Jiang, Z. (2002). An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 125–126, 657–663. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00377-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00377-1).
2. Ahmed, R., Sutcliffe, M. P. F. (2000). Identification of surface features on cold-rolled stainless steel strip. *Wear*, 244(1–2), 60–70. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00442-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00442-7).
3. Lenard, J. G. (2004). The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 152(2), 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.026>.
4. Andersson, S., Salas-Russo, E. (1994). The influence of surface roughness and oil viscosity on the transition in mixed lubricated sliding steel contacts. *Wear*, 174(1–2), 71–79. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90089-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90089-2).
5. Kukhar, V., Spichak, O., Pashynskiy, V., Malii, K., Balalayeva, E., Marchenko, I., & Tuzenko, O. (2025). A data-driven approach to the selection of sustainable emulsions for cold-rolled steel production. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 23(2), 5–16. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15862796>.
6. Spichak, O. Yu., Kukhar, V. V., Shyrokobokov, V. V. (2024). Vplyv parametriv vidpalu u kovpakovykh pechakh na chystotu poverkhni kholodnokatanoho prokatu [Influence of annealing parameters in bell-type furnaces on the surface cleanliness of cold-rolled products]. *International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 –*

The mining and metals sector: integration of business, technology and education": conference proceedings, 1, 186–189. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-65>. [in Ukrainian].

7. Kukhar, V. V., Spichak, O. Yu., Pashynskyi, V. V., & Malii, Kh. V. (2024). Vyprobuvannia emulsoliv dlia kholodnoi prokatky na sazhoutvorennia pry vidpali ruloniv [Testing of emulsols for cold rolling for soot formation during coil annealing]. *Obrobka materialiv tyskom – Materials Working by Pressure*, (1(53)), 116–128. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)116](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)116). [in Ukrainian].

8. Kukhar, V. V., Spichak, O. Yu., Balalaieva, O. Yu., & Marchenko, I. F. (2024). Rozrobka matematychnykh modelei zmin kontsentratsii emulsii ta vmistu mekhanichnykh domishok u tekhnolohichnykh ridynakh z vykorystanniam paketu MATLAB dlia obrobky eksperymentalnykh danykh [Development of mathematical models of changes in emulsion concentration and content of mechanical impurities in technological fluids using the MATLAB package for processing experimental data]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, (49), 100–109. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321216>. [in Ukrainian].

9. Kijima, H. (2014). Influence of roll radius on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(5), 1111–1119. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.019>.

10. Miranda, A. C. M., Neto, C. L., Labiapari, W. da S., Pereira, P. H. R., Cetlin, P. R., & Arias, A. R. (2025). Study of the coefficient of friction and forward slip in cold rolling of stainless steel AISI 430 in Sendzimir mills. *Journal of Materials Research and Technology*, 34, 912–923. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.106>.

11. Çolak, B., Ahmed, Z., Özakin, B., & Kurgan, N. (2023). An experimental investigation into roughness transfer in asymmetrical rolling of steel strips. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 1070–1089. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1289221>.

12. Cavallari, M., Gaboardi, P., McWhirter, R., Perassolo, M., & Trevisan, C. (2015). New surface finishes for cold rolling mills. *Proceedings of the 2nd ESTAD Conference (METEC 2015)*, 1–6.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 10.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 622.785:544.77

DOI https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-17

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІЗНИХ СУМІШЕЙ ГЛИНИСТИХ СУСПЕНЗІЙ

Чупринов Євген Валерійович,

кандидат технічних наук, доцент,

в.о. проректора з наукової роботи,

доцент кафедри металургійних технологій

Державного університету економіки і технологій

ORCID ID: 0000-0001-8605-3434

Проведено комплексний аналіз структурно-механічних та реологічних властивостей глинистих суспензій, що використовуються як сполучні добавки у виробництві залізорудних окатишів. Обґрунтовано недостатність традиційного оцінювання глини за параметрами набухання та колоїдності, пропонуючи натомість глибоке вивчення динамічних зсувних деформацій, в'язкості та пластичності в системі «глина – вода». Дослідження базуються на методах фізико-хімічної механіки дисперсних структур із використанням приладу Вейлера-Рейбіндера для побудови кривих залежності деформації від часу. В ході експериментів було систематизовано глини Черкаського та Даш-Салахлінського родовищ за шістьма структурно-механічними типами залежно від співвідношення швидкої еластичної, повільної еластичної та пластичної деформацій. Встановлено, що суспензії бентоніту Даш-Салахлінського родовища та четвертого шару Черкаського родовища характеризуються високою Шведовською в'язкістю, значною енергією молекулярної взаємодії та належать до четвертого типу з переважанням швидких еластичних деформацій, що свідчить про стабільність їхньої коагуляційної структури. На противагу їм, монтморилоніт другого шару утворює системи п'ятого типу з високою плинністю та низьким рівноважним модулем зсуву. Особливу увагу приділено дослідженню змішаних композицій. Доведено, що додавання глини четвертого шару до монтморилоніту суттєво підвищує енергію зчеплення частинок, тоді як введення каолініту діє як пластифікатор, знижуючи в'язкість та міцність структури. Отримані результати дозволяють оптимізувати склад сполучних добавок для забезпечення необхідної міцності сухих та сухих окатишів у металургійному виробництві, враховуючи реологічну поведінку конкретних мінеральних сумішей.

Ключові слова: металургійне виробництво, залізорудна сировина, окатиші, бентонітові глини, сполучна добавка, фізико-хімічні властивості, оптимізація, енергія зчеплення.

Chuprynov Yevhen. Research of structural and mechanical properties of various mixtures of clay suspensions

A comprehensive analysis of the structural-mechanical and rheological properties of clay suspensions used as binding additives in the production of iron ore pellets has been conducted. The inadequacy of traditional clay evaluation based on swelling and colloidal parameters is demonstrated, and instead, an in-depth study of dynamic shear deformations, viscosity, and plasticity in the "clay-water" system is proposed. The study is based on methods of physicochemical mechanics of dispersed structures using a Weiler-Rebinder apparatus to construct time-dependent deformation curves. During the experiments, clays from the Cherkasy and Dash-Salakhlinisky deposits were classified into six structural-mechanical types based on the ratio of fast elastic, slow elastic, and plastic deformations. It was established that suspensions of bentonite from the Dash-Salakhlinisky deposit and the fourth layer of the Cherkasy deposit are characterized by high Shvedov viscosity, significant molecular interaction energy, and belong to the fourth type with a predominance of fast elastic deformations, which indicates the stability of their coagulation structure. In contrast, the montmorillonite of the second layer forms fifth-type systems with high fluidity and a low equilibrium shear modulus. It has been demonstrated that adding fourth-layer clay to montmorillonite significantly increases particle bonding energy, whereas the introduction of kaolinite acts as a plasticizer, reducing the viscosity and structural strength. The results obtained allow for the optimization of the composition of binding additives to ensure the necessary strength of green and dry pellets in metallurgical production, taking into account the rheological behavior of specific mineral mixtures.

Key words: metallurgical production, iron ore raw materials, pellets, bentonite clays, binder additive, physicochemical properties, optimization, binding energy.

Вступ. Як відмічено дослідниками та промисловим досвідом багатьох підприємств [1-16], на сьогоднішній день виробники залізорудних окатишів для оцінки властивостей глинистої сполучної добавки в більшій мірі спираються на два основних параметра її характеристик – набухання та колоїдність.

Ці два параметри дають лише односторонню характеристику монтморилонітової глини як дисперсної фази в системі «глина – вода» і, при тому, вельми незначну. Оскільки ця система утворюється в поровому просторі між частинками концентрату тільки з початком процесу огрудкування і концентрація суспензії при

цьому досягає 10-30 %, стійкість такої системи в сенсі її взаємодії зі стінками частинок концентрату повинна характеризуватися динамічними зсувними деформаціями, в'язкістю і пластичністю, тобто міцністю просторової коагуляційної структури [17].

Наявність просторової структури системи визначається шляхом вимірювання механічних властивостей, і найпростіше, розвитком деформації зсуву під дією постійного напруження. За характером розвитку деформацій глини можуть бути віднесені до шести структурно-механічних типів:

$$1 - \varepsilon_0' > \varepsilon_2' > \varepsilon_1'; \quad 2 - \varepsilon_2' > \varepsilon_0' > \varepsilon_1';$$

$$3 - \varepsilon_2' > \varepsilon_1' > \varepsilon_0';$$

$$4 - \varepsilon_0' > \varepsilon_1' > \varepsilon_2'; \quad 5 - \varepsilon_1' > \varepsilon_0' > \varepsilon_2';$$

$$6 - \varepsilon_1' > \varepsilon_2' > \varepsilon_0';$$

де ε_0' – відносно швидка еластична деформація у %;

ε_2' – відносно повільна еластична деформація у %;

ε_1' – відносна пластична деформація у %.

Зі співвідношеннями ε_0' , ε_2' і ε_1' пов'язані технологічні властивості суспензій. За переважанням розвитку швидких деформацій (1 і 4 типи) можна судити про більшу стійкість системи. 2 і 3 типи відрізняються переважним розвитком повільних еластичних деформацій. Глинисті пасти, що відносяться до цих типів, добре формуються. Значний розвиток пластичних деформацій характерний для 5 і 6 типів, для яких коагуляційні структури глинистих суспензій нестійкі і мають велику плинність.

Таким чином, для більш повної характеристики зміцнювальної добавки була поставлена задача вивчення структурно-механічних властивостей суспензій методами фізико-хімічної механіки глинистих дисперсій. У стаціонарному стані реологічні властивості визначалися методом тангенціального зміщення пластинки, що дозволяє отримати криві «ступінь деформація – час ($\varepsilon=f(t)$)» при постійному навантаженні $P = \text{const}$ на приладі Вейлера-Ребіндера [18-20].

Методи та методики дослідження. Підготовка глинистих суспензій проводилася за такою методикою: наважка очищених глинистих мінералів заливалася дистильованою водою і залишалася для набухання протягом 4 годин. Після набухання система піддавалася інтенсивному перемішуванню в гомогенізаторі тривалістю 10-15 хвилин і залишалася в спокої в лабораторному екстракторі протягом 24 годин.

Після контрольної перевірки правильності підготовки досліду вибирається вага першого

навантаження шляхом короточасних навантажень зразка невеликими поступово зростаючими вантажами. Деформація відраховується за допомогою автоматичного запису кривої $\varepsilon = f(t)$ після закінчення 10; 20; 30; 60; 90; 120; 150; 180; 210; 240; 270 і 300 сек. Далі проводиться розвантаження з таким же порядком відліку, як і при навантаженні. Тривалість розвантаження – 100 секунд.

Результати та дискусії. За отриманими даними для всіх навантажень були побудовані криві «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(t)$)» (рис. 1-11).

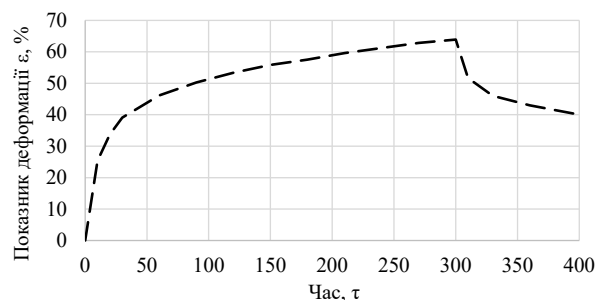


Рис. 1. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(t)$)» для глини 2 шару Черкаського родовища (30 %-ва суспензія)

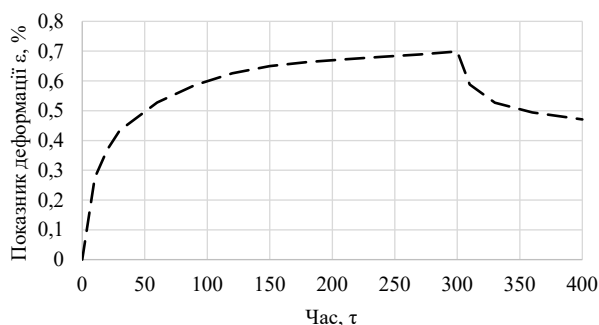


Рис. 2. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(t)$)» для глини 3 шару Черкаського родовища (30 %-ва суспензія)

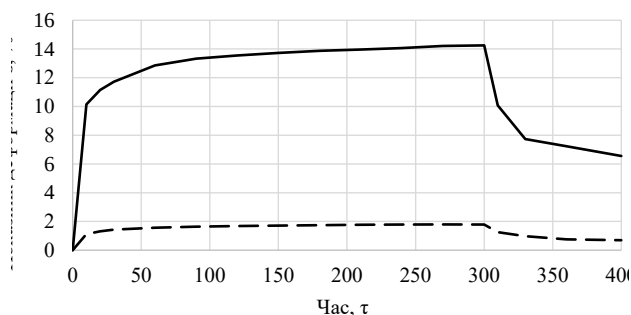


Рис. 3. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(t)$)» для глини 4 шару Черкаського родовища (---- – 20 %-ва суспензія, --- – 30 %-ва суспензія)

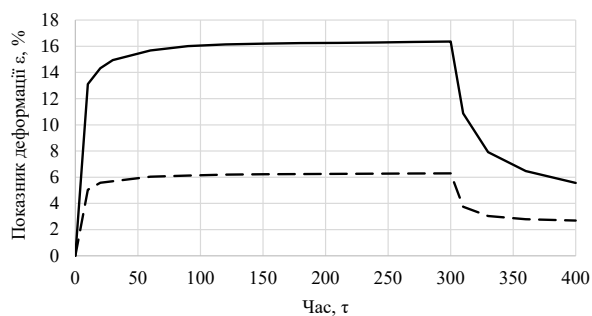


Рис. 4. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для бентоніту Даш-Салахлінського родовища (----- – 10 %-ва суспензія, — — — — 20 %-ва суспензія)

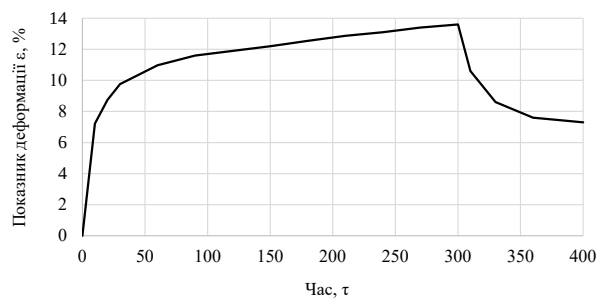


Рис. 7. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 4 шару (50 %) і 2 шару (50 %) Черкаського родовища, 20 %-ва суспензія

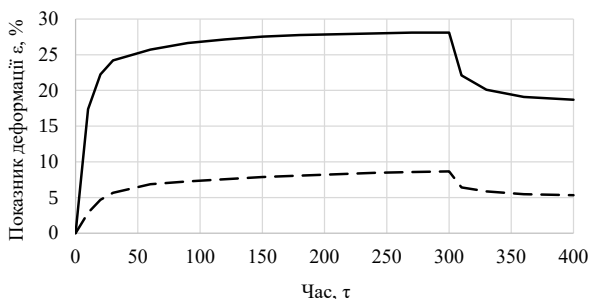


Рис. 5. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 4 шару (20 %) і 2 шару (80 %) Черкаського родовища (----- – 20 %-ва суспензія, — — — — 30 %-ва суспензія)

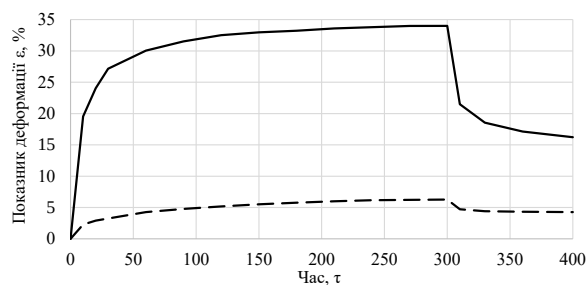


Рис. 8. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 2 шару (55 %), 4 шару (20 %) Черкаського родовища, каолініту (20 %) та бентоніту Даш-Салахлінського родовища (5 %) (----- – 20 %-ва суспензія, — — — — 30 %-ва суспензія)

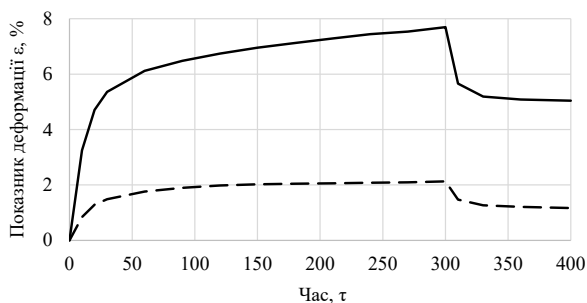


Рис. 6. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 4 шару Черкаського родовища (50 %) і каолініту (50 %) (----- – 20 %-ва суспензія, — — — — 30 %-ва суспензія)

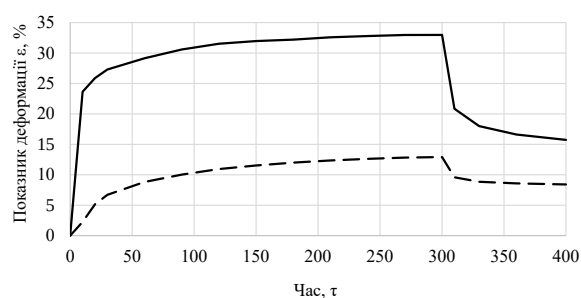


Рис. 9. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\epsilon=f(\tau)$)» для суміші глин 2 шару (60 %), 4 шару (20 %) Черкаського родовища та каолініту (20 %) (----- – 20 %-ва суспензія, — — — — 30 %-ва суспензія)

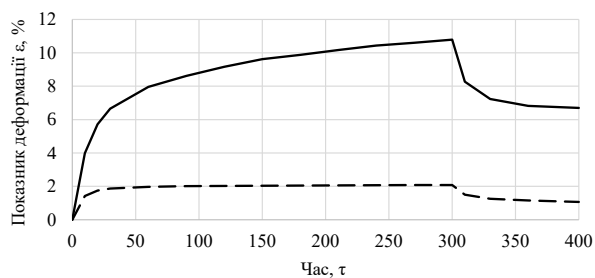


Рис. 10. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(\tau)$)» для суміші глини 4 шару (50 %) Черкаського родовища, каолініту (45 %) та бентоніту Даш-Салахлінського родовища (5 %) (----- – 20 %-ва суспензія, — — — — 30 %-ва суспензія)

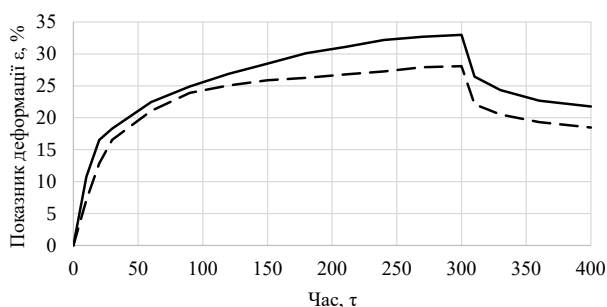


Рис. 11. Крива залежності «ступінь деформації – час ($\varepsilon=f(\tau)$)» для 65 % суміші А (3 шар (10 %) і 2 шар (90 %) Черкаського родовища), каолініту (30 %) та бентоніту Даш-Салахлінського родовища (5 %) (----- – 20 %-ва суспензія, — — — — 30 %-ва суспензія)

Структурно-механічні константи системи розраховували за відповідними формулами на основі графічної обробки кривих $\varepsilon - \tau$.

Для початку були розраховані модулі пружності зсуву (E , Па), а саме умовно миттєвий модуль пружної або швидкої деформації, умовно миттєвий модуль еластичності та рівноважний модуль.

Умовно миттєвий модуль E_1 відповідає пружній або швидкій еластичній деформації ε_0 і розвивається після накладення напруги зсуву і спадає після розвантаження зі швидкістю звуку за рівнянням

$$E_1 = \frac{P}{\varepsilon_0},$$

де P – напруга зсуву;

ε_0 – швидка еластична деформація.

P , у свою чергу, обчислювали з виразу

$$P = \frac{Fg}{S},$$

де F – навантаження в г;

S – площа рифлених пластин;

g – прискорення вільного падіння (для спрощення розрахунків приймається рівним 10 м/сек).

Умовно-миттєвий модуль E_2 (модуль еластичності) відповідає повільній еластичній деформації і обчислюється з виразу

$$E_2 = \frac{P}{\varepsilon_2},$$

де ε_2 – повільна еластична деформація (визначається на підставі дослідів).

Рівноважний модуль E відповідає повному розвитку деформації системи і обчислюється на підставі даних E_1 і E_2 як

$$E_3 = \frac{(E_1 \cdot E_2)}{(E_1 + E_2)}.$$

Умовну статистичну межу плинності (P_{K1}) визначали за допомогою прямої $(d\varepsilon/d\tau) = f(P)$, що відсікає на осі P відрізок, рівний P_{K1} . $(d\varepsilon/d\tau)$ визначали як тангенс кута нахилу між віссю τ (час) і дотичною, проведеною до будь-якої точки на кривій $\varepsilon = f(P)$, після повного розвитку швидкої і повільної еластичних деформацій.

Найбільшу пластичну в'язкість (Шведовську) визначали з виразу

$$\eta = \frac{(P - P_{K1})}{(d\varepsilon/d\tau)},$$

при значенні $d\varepsilon/d\tau = 1$, де P – діюче напруження зсуву при $d\varepsilon/d\tau = 1$.

Крім зазначених констант, були розраховані деякі константи, безпосередньо пов'язані з технологічними властивостями суспензій.

Повільна еластичність λ (безрозмірна величина) була розрахована за формулою

$$\lambda = \frac{E}{(E_1 + E_2)}.$$

Також розрахована пластичність P_{K1}/η для неруйнованих структур глинистих суспензій і період релаксації – час, протягом якого пружна напруга спадає на певну величину при постійності спочатку заданої деформації, тобто час поступового розсмоктування пружної енергії, запасеної в деформованому тілі шляхом переходу її в тепло. Період релаксації визначається як відношення Шведовської в'язкості до модуля пружності системи, тобто

$$Q = \frac{\eta}{E}.$$

Для характеристики величини молекулярних сил зчеплення між частинками глинистих мінералів у коагуляційній структурі розраховувався умовний модуль деформації Es_{ym} , кДж/м³. Крім того, обчислювалися відносні деформації

$$\varepsilon'_0 = \frac{P}{E_1} \text{ (швидка),}$$

$$\varepsilon'_2 = \frac{P}{E_2} \text{ (повільна),}$$

$$\varepsilon'_1 \tau = \frac{(P - P_{K1}) \cdot \tau}{\eta} \text{ (еластична і пластична)}$$

за час ~ 1000 сек. За цей час встигають повністю розвинути всі види деформацій. За характером розвитку відносних деформацій визначався тип коагуляційної структури.

Результати розрахунків згідно наведених формул зведені в таблиці 1. З неї випливає, що 20 % суспензія II шару утворює нестійку систему, яка розшаровується менш ніж через 24 години. Суспензії з бентоніту Даш-Салахлінського родовища утворюють дуже в'язкі пасти з високою межею плинності (402 Па), великою енергією взаємодії між частинками (24,39 кДж/м³) і відносяться до 4 структурно-механічного типу, з переважанням швидких еластичних деформацій. До 4 типу відносяться також 20 % суспензій з IV шаром, яка, як і суспензія з бентонітом Даш-Салахлінського родовища, має високу Шведовську в'язкість, високу межу плинності, велику енергію взаємодії між частинками (9,9 кДж/м³). Дещо нижчі значення структурно-механічних характеристик у суспензії з палигорскітом третього шару.

Це пояснюється тим, що зі збільшенням концентрації суспензії палигорскіту швидка еластична деформація збільшується і знижується пластична, а при концентрації вище 19 % система з 4 переходить у 5 структурно-механічний тип. 30 % суспензія монтморилоніту 2-го шару відноситься до 5 структурно-механічного типу, для якого характерна велика плинність.

На відміну від суспензій з глинами третього і четвертого шарів і Са-монтморилонітом родовища Даш-Салахлін для суспензії з монтморилонітом 2 шару характерні дуже низькі показники в'язкості (Шведовської) та рівноважного модуля зсуву, але високі значення статичної пластичності, що ймовірно пов'язано зі слабким зчепленням частинок одна з одною ($E\varepsilon_{ум} = 0,143$ кДж/м³).

Вивчення структурно-механічних і реологічних сумішей глин різних шарів показало, що додавання до 20 % глини четвертого шару до монтморилоніту значно покращує властивості останнього, збільшує енергію зчеплення між частинками в суспензії до 1,38 кДж/м³. Застосування каолініту в глинистих композиціях відіграє роль пластифікатора, робить суспензію більш рухливою, пластичною і відповідно менш в'язкою. Додавання 50 % каолініту до глини

четвертого шару призводить до різкого зниження в'язкості системи (з 21300 до 4500 кПа·с для 30 % суспензії), зниження міцності структури, збільшення пластичності і зниження енергії зчеплення між частинками суспензії.

Досліди показали, що застосування невеликої кількості (до 5 %) по відношенню до інших глинистих мінералів монтморилоніту ДС в глинистих композиціях мало впливає на властивості суспензій.

Висновки. На основі проведених досліджень встановлено, що традиційні показники набухання та колоїдності не дають вичерпної оцінки технологічної придатності глинистих добавок для виробництва залізородних окатишів. Визначення структурно-механічного типу суспензій за співвідношенням швидких еластичних, повільних еластичних та пластичних деформацій дозволяє глибше прогнозувати стабільність коагуляційної структури в системі «глина – вода». Зокрема, доведено, що найбільш стійкі системи з високою енергією молекулярної взаємодії та значною Шведовською в'язкістю утворюють бентоніти Даш-Салахлінського родовища та четвертого шару Черкаського родовища, які належать до четвертого структурно-механічного типу.

Експериментально підтверджено суттєвий вплив мінерального складу та концентрації суспензій на їхні реологічні константи. З'ясовано, що монтморилоніт другого шару Черкаського родовища характеризується низьким рівноважним модулем зсуву та високою плинністю, що відносить його до менш стабільного п'ятого типу. Водночас палигорскітові глини третього шару при підвищенні концентрації понад 19 % демонструють перехід між структурними типами, що супроводжується зростанням швидких еластичних деформацій та зниженням пластичності, прямо впливаючи на зміцнювальні властивості зв'язуючого матеріалу.

Результати вивчення змішаних глинистих композицій відкривають можливості для цілеспрямованого регулювання властивостей сполучних добавок шляхом їхнього комбінування. Встановлено, що додавання до 20 % високоактивної глини четвертого шару до монтморилоніту значно інтенсифікує процеси зчеплення частинок, тоді як введення каолініту виконує роль ефективного пластифікатора, знижуючи в'язкість та міцність структури для досягнення необхідної рухливості системи. Отримані дані щодо періодів релаксації та умовних меж плинності є науковим підґрунтям для оптимізації процесів огрудування залізородної шихти в промислових умовах.

Результати розрахунків властивостей глинистих суспензій

Суміші сполучних добавок		Технологічні властивості												
		Е ₁ , кПа	Е ₂ , кПа	Е, кПа	Р _к , Па	η, кПа·с	λ	Р _к /η, сек ×10 ⁻⁵	Еε _{кр} /η ³ кДж/м ³	θ, сек	ε ₀ [']	ε ₂ [']	ετ	Тип
		утворює нестійку систему, суспензія розшаровується												
1	2 шар, ЧМ ¹	0,83	2,34	0,62	15,7	171	0,413	9,25	0,143	395	0,24	0,085	1,08	5
2	2 шар, ЧМ ²	10,40	10,90	5,33	52,0	3400	0,489	15,5	24,6	639	—	—	—	5
3	3 шар ¹	76,00	1,24	47,00	1,27	7500	0,385	1,69	14,5	165	0,0026	0,00148	0,0097	5
4	3 шар ²	20,00	120,00	17,14	115,0	21300	0,143	0,540	9,90	1242,5	0,1	0,017	0,085	4
5	4 шар ¹	1,83	730,00	146,00	485,0	116000	0,2	0,4181	7,38	794,5	0,011	0,003	0,01306	5
6	4 шар ²	1,55	11,25	1,36	12,0	3600	0,121	0,333	1,00	2639,3	0,13	0,018	0,052	4
7	бентоніт ДС (10 %)	39,38	550,00	36,74	402,0	60200	0,0668	0,668	24,39	1638,4	0,051	0,004	0,0265	4
8	бентоніт ДС ¹	утворює дуже в'язку пасту, властивості якої неможливо виміряти												
9	бентоніт ДС ²													
10	4 шар (20 %) + 2 шар (80 %) ¹	1,19	6,67	1,01	11,0	700	0,151	1,571	0,425	694,4	0,17	0,03	0,27	5
11	4 шар (20 %) + 2 шар (80 %) ²	7,50	30,00	6,00	23,0	1600	0,2	1,437	1,38	266,67	0,0267	0,0267	0,1106	5
12	4 шар (50 %) + каолініт (50 %) ¹	6,44	16,00	4,59	16,0	1650	0,287	0,97	1,29	359	0,031	0,0125	0,1115	5
13	4 шар (50 %) + каолініт (50 %) ²	25,00	50,00	16,67	60,0	4500	0,333	1,339	4,651	269,94	0,008	0,004	0,031	5
14	4 шар (50 %) + 2 шар (50 %) ¹	2,86	7,33	2,06	98,0	1570	0,28	0,624	0,917	763,6	0,07	0,03	0,12	5
15	2 шар (55 %) + 4 шар (20 %) + каолініт (20 %) + ДС ³ (5 %) ¹	1,05	3,50	0,81	80,1	625	2,3077	1,28	0,36	773,7	0,1905	0,0571	0,3072	5
16	2 шар (55 %) + 4 шар (20 %) + каолініт (20 %) + ДС ³ (5 %) ²	9,40	47,00	7,33	27,0	1400	0,17	1,93	1,34	192	0,0213	0,0043	0,1236	5
17	2 шар (60 %) + 4 шар (20 %) + каолініт (20 %) ¹	0,97	0,96	0,48	11,5	80	0,502	14,375	0,0722	165,3	0,2059	0,2074	2,3563	5
18	2 шар (60 %) + 4 шар (20 %) + каолініт (20 %) ²	10,50	27,50	7,60	39,0	1300	0,276	3	1,392	171,1	0,019	0,073	0,1238	5
19	4 шар (50 %) + каолініт (45 %) + ДС (5 %) ¹	5,33	14,00	3,86	27,8	920	0,2757	3,24	0,837	238	0,0375	0,0143	0,187	5
20	4 шар (50 %) + каолініт (45 %) + ДС (5 %) ²	13,80	65,00	33,12	98,0	8200	1,59	1,20	6,800	248	0,014	0,003	0,0124	4
21	суміш А ⁴ (65 %) + каолініт (30 %) + ДС (5 %) ¹	2,00	3,60	1,29	7,7	330	0,3571	2,33	0,271	256,8	0,1	0,055	0,5827	5
22	суміш А ⁴ (65 %) + каолініт (30 %) + ДС (5 %) ²	3,08	6,18	2,06	27,5	280	0,3326	9,821	0,281	136,2	0,064	0,032	0,616	5

¹ – 20 %-ва суспензія загальної суміші, ² – 30 %-ва суспензія загальної суміші, ³ – бентонітова глина Даш-Салахлінського родовища, ⁴ – суміш А – 3 шар (10 %) + 2 шар (90%)

ЛІТЕРАТУРА:

1. Villanueva A., Hoff S., Michailovski A. Basf novel iron ore binder technology: study of bentonite modification. *5º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios*. Editora Blucher, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5151/2594-357x-30407>.
2. Forsmo S. P. E., Apelqvist A. J., Björkman B. M. T. et al. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder. *Powder Technology*. 2006. Vol. 169, No. 3. P. 147–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.008>.
3. Forsmo S. P. E., Vuori J. P. The determination of porosity in iron ore green pellets by packing in silica sand. *Powder Technology*. 2005. Vol. 159, No. 2. P. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.032>.
4. Kawatra S. K., Ripke S. J. Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization. *International Journal of Mineral Processing*. 2002. Vol. 65, No. 3-4. P. 141–149. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(01\)00062-x](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(01)00062-x).
5. Ripke S. J., Kawatra S. K. Bentonite binder effective strength (BEST) test for unfired iron ore pellets. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2004. Vol. 21, No. 2. P. 65–70. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf03403305>.
6. Desai R. R., Desa E. J. A., Aswal V. K. Hydration studies of Bentonite clay. *SOLID STATE PHYSICS: Proceedings of the 56th DAE Solid State Physics Symposium 2011*. AIP, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4709948>.
7. Bährle-Rapp M. Montmorillonite. *Springer Lexikon Kosmetik und Körperpflege*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. P. 360. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-71095-0_6695.
8. Bentonite and bentonite suspensions. *Bentonite Handbook*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. P. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783433606520.ch2>.
9. Tugrul N., Derun E. M., Piskin M. Effects of calcium hydroxide and calcium chloride addition to bentonite in iron ore pelletization. *Waste Management & Research*. 2006. Vol. 24, No. 5. P. 446–455. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242x06066119>.
10. Koroğlu M. Use of calcined colemanite and bentonite as binders in the pelletizing of Hasan Çelebi iron ore : M.Sc. Thesis / Middle East Technical University. Ankara, Turkey, 1980.
11. Carmignano O. R. D. R., Carvalho C. d. F. Comparison between bentonite and serpentinite in the production process of iron ore pellets. *Rem: Revista Escola de Minas*. 2014. Vol. 67, No. 1. P. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0370-44672014000100007>.
12. Zhu D., Pan J., Lu L. et al. Iron ore pelletization. *Iron Ore*. Elsevier, 2015. P. 435–473. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-156-6.00015-0>.
13. Wong G., Fan X., Gan M. et al. Improvement on the thermal cracking performance of pellets prepared from ultrafine iron ore. *Powder Technology*. 2019. Vol. 342. P. 873–879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.090>.
14. Kopyrin I. A., Graur I. F., Ryabokon' F. A. et al. Mechanical strength of iron-ore pellets. *Metallurgist*. 1975. Vol. 19, No. 3. P. 156–159. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00740333>.
15. Tavares L. M., de Almeida R. F. Breakage of green iron ore pellets. *Powder Technology*. 2020. Vol. 366. P. 497–507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.074>.
16. Moraes S. L. d., Lima J. R. B. d., Ribeiro T. R. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. InTech, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>.
17. Wan W., Ge L. Research and application of high-performance water-based drilling fluid in Changning shale gas block. *Drill. Prod. Technol.* 2019. Vol. 42. P. 83–86.
18. Huang X., Shen H., Sun J. et al. Nanoscale Laponite as a Potential Shale Inhibitor in Water-Based Drilling Fluid for Stabilization of Wellbore Stability and Mechanism Study. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018. Vol. 10, No. 39. P. 33252–33259. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.8b11419>.
19. Zhong H., Huang W., Lin Y. et al. Performance evaluation of new polyamine shale inhibitor. *Pet. Drill. Technol.* 2011. Vol. 06. P. 48–52.

REFERENCES:

1. Villanueva, A., Hoff, S., & Michailovski, A. (2017). BASF NOVEL IRON ORE BINDER TECHNOLOGY: STUDY OF BENTONITE MODIFICATION. *Y 5º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios*. Editora Blucher. <https://doi.org/10.5151/2594-357x-30407>
2. Forsmo, S. P. E., Apelqvist, A. J., Björkman, B. M. T., & Samskog, P. O. (2006). Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder. *Powder Technology*, 169(3), 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.08.008>
3. Forsmo, S. P. E., & Vuori, J. P. (2005). The determination of porosity in iron ore green pellets by packing in silica sand. *Powder Technology*, 159(2), 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.032>

4. Kawatra, S. K., & Ripke, S. J. (2002). Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization. *International Journal of Mineral Processing*, 65(3-4), 141–149. [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(01\)00062-x](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(01)00062-x)
5. Ripke, S. J., & Kawatra, S. K. (2004). Bentonite binder effective strength (BEST) test for unfired iron ore pellets. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 21(2), 65–70. <https://doi.org/10.1007/bf03403305>
6. Desai, R. R., Erwin Desa, J. A., & Aswal, V. K. (2012). Hydration studies of Bentonite clay. *Y SOLID STATE PHYSICS: Proceedings of the 56th DAE Solid State Physics Symposium 2011*. AIP. <https://doi.org/10.1063/1.4709948>
7. Bährle-Rapp, M. (2007). Montmorillonite. *Springer Lexikon Kosmetik und Körperpflege* (p. 360). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71095-0_6695
8. Bentonite and bentonite suspensions. (2017). *Bentonite Handbook* (c. 9–20). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783433606520.ch2>
9. Tugrul, N., Derun, E. M., & Piskin, M. (2006). Effects of calcium hydroxide and calcium chloride addition to bentonite in iron ore pelletization. *Waste Management & Research*, 24(5), 446–455. <https://doi.org/10.1177/0734242x06066119>
10. Köroğlu, M. (1980). Use of calcined colemanite and bentonite as binders in the pelletizing of Hasan Çelebi iron ore. *M.Sc. Thesis, Middle East Technical University*. Ankara, Turkey.
11. Carmignano, O. R. D. R., & Carvalho, C. d. F. (2014). Comparison between bentonite and serpentinite in the production process of iron ore pellets. *Rem: Revista Escola de Minas*, 67(1), 47–53. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672014000100007>
12. Zhu, D., Pan, J., Lu, L., & Holmes, R. J. (2015). Iron ore pelletization. *Iron Ore* (p. 435–473). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-156-6.00015-0>
13. Wong, G., Fan, X., Gan, M., Ji, Z., Chen, X., Tian, Z., & Wang, Z. (2019). Improvement on the thermal cracking performance of pellets prepared from ultrafine iron ore. *Powder Technology*, 342, 873–879. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.090>
14. Kopyrin, I. A., Graur, I. F., Ryabokon', F. A., & Solov'ev, N. M. (1975). Mechanical strength of iron-ore pellets. *Metallurgist*, 19(3), 156–159. <https://doi.org/10.1007/bf00740333>
15. Tavares, L. M., & de Almeida, R. F. (2020). Breakage of green iron ore pellets. *Powder Technology*, 366, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.074>
16. Moraes, S. L. d., Lima, J. R. B. d., & Ribeiro, T. R. (2018). Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>
17. Wan, W., Ge, L. (2019). Research and application of high-performance water-based drilling fluid in Changning shale gas block. *Drill. Prod. Technol*, 42, 83-86.
18. Huang, X., Shen, H., Sun, J., Lv, K., Liu, J., Dong, X., & Luo, S. (2018). Nanoscale Laponite as a Potential Shale Inhibitor in Water-Based Drilling Fluid for Stabilization of Wellbore Stability and Mechanism Study. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(39), 33252–33259. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b11419>
19. Zhong, H., Huang, W., Lin, Y., Qiu, Z., Liu, G., Zhang, G. (2011). Performance evaluation of new polyamine shale inhibitor. *Pet. Drill. Technol*, 06, 48-52.

Дата першого надходження статті до видання: 03.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 661:658.512

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-18>

АЛГОРИТМ ГРУПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ УРАХУВАННЯМ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ ОБЛАДНАННЯ

Бабенко Марина Олегівна,

кандидат педагогічних наук,

старший викладач кафедри прикладної механіки

Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет»

ORCID ID: 0009-0005-3125-1990

Вірич Світлана Олександрівна,

кандидат технічних наук,

завідувач кафедри прикладної механіки

Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет»

ORCID ID: 0000-0003-4734-345X

В статті представлені дослідження впливу чинників формування груп деталей на ефективність реалізації групового технологічного процесу, розроблення адаптованого до сучасних виробничих умов алгоритму групування за деталі-операціями із урахуванням завантаженості верстатів. З урахуванням чинників розробленого алгоритму проведено конструктивно-технологічний аналіз для заданої групи деталей з урахуванням партії виробництва. Серед розглянутих можливих варіантів оброблення поверхонь заготовок, обрані більш раціональні за ознакою рівномірності завантаження технологічного обладнання. Розроблено альтернативний варіант групового технологічного процесу шляхом перерозподілу деталі-операцій із урахуванням чинника завантаженості токарних і фрезерних верстатів із ЧПК. В результаті було суттєво зменшено час простою задіяних верстатів із ЧПК, загальний час оброблення заготовок деталей зменшено на 40 %, час роботи токарного верстату із ЧПК зменшено на 30% у порівнянні із початковим варіантом оброблення. Встановлено закономірності впливу технологічних чинників на процес формування груп деталей при проектуванні групового технологічного процесу; розроблено алгоритм групування деталей, що дозволяє підвищити ефективність використання виробничих ресурсів; підтверджено ефективність запропонованого алгоритму на основі розрахунку та аналізу техніко-економічних показників. Запропоновано використання алгоритму групування деталей із урахуванням завантаженості верстатного обладнання в умовах серійного виробництва із використанням сучасних машинобудівних технологій. Раціональна організація технологічних процесів забезпечує підвищення продуктивності праці за рахунок забезпечення мінімізації часу простоїв обладнання та робочих, уможливлення визначення оптимальних розмірів партій оброблюваних деталей, зменшення кількості переналадок верстатів, отримання безперебійного подавання деталей до складання виробів.

Ключові слова: груповий технологічний процес, технологічна підготовка, верстати із ЧПК, технологічні групи деталей, верстатне обладнання, технологічне оснащення, техніко-економічні показники ефективності технологічного процесу.

Babenko Maryna, Virych Svitlana. Algorithm for Grouping Parts Considering Equipment Utilization

The article presents studies of the influence of factors of forming groups of parts on the efficiency of the implementation of the group technological process, the development of an algorithm of grouping by part operations adapted to modern production conditions, taking into account the workload of machines. Taking into account the factors of the developed algorithm, a structural and technological analysis was carried out for a given group of parts, taking into account the production batch. Among the considered possible options for processing the surfaces of workpieces, more rational ones were selected based on the uniformity of the loading of technological equipment. An alternative version of the group technological process was developed by redistributing detail operations, taking into account the factor of loading of CNC lathes and milling machines. As a result, the downtime of the CNC machines involved was significantly reduced, the total time for machining workpieces was reduced by 40%, the operating time of the CNC lathe was reduced by 30% compared to the initial machining option. The patterns of influence of technological factors on the process of forming groups of parts when designing a group technological process were established; an algorithm for grouping parts was developed, which allows to increase the efficiency of the use of production resources; the effectiveness of the proposed algorithm was confirmed based on the calculation and analysis of technical and economic indicators. The use of a parts grouping algorithm taking into account the workload of machine tools in serial production using modern machine-building technologies is proposed.

Key words: group technological process, technological preparation, CNC machines, technological groups of parts, machine tool equipment, technological equipment, technical and economic indicators of the efficiency of the technological process.

Вступ. Забезпечення конкурентоспроможності виробів шляхом забезпечення високого рівня якості за збереження доступної цінової політики вимагає реорганізації діяльності промислового підприємства способом автоматизації процесів при використанні сучасних комп'ютерних засобів та спеціалізованих ІТ-технологій інформатизації технологічної підготовки виробництва.

Автоматизація сучасного виробництва має враховувати такі тенденції розвитку: мала серійність виробництва зі зміною номенклатури продукції; забезпечення реконфігурованості обладнання та виробництва в цілому; комплексність технічних рішень; широке впровадження наукомістких технологій, впровадження мехатронних систем для забезпечення багатофункціональності та одночасно компактності обладнання.

Обов'язковою складовою ефективності сучасного виробництва є його гнучкість, яка полягає у здатності підприємства швидко, ефективно та з мінімальними витратами адаптувати технологічні процеси до випуску широкої номенклатури виробів.

Успішна реалізація чинників автоматизації та гнучкості потребує наявності алгоритмів адаптивного управління технологічними процесами, методи статистичної корекції баз даних, що є основою створення автоматичних виробничих систем, що самонавчаються.

При вирішенні завдань організації та управління пріоритетним є використання віртуальних виробничих систем, у яких інформація зберігається лише в пам'яті електронно-обчислювальних машин. Тому створення єдиної системи технологічної підготовки виробництва та управління дозволяє реалізувати найефективніші технічні рішення, максимально розкрити технічні та технологічні можливості автоматизованої виробничої системи. Взаємозв'язок між організацією, управлінням та технологічним проектуванням вимагає наявності відповідних алгоритмів програмної взаємодії та наявності віртуальної інформаційної бази ефективним способом підвищення гнучкості автоматизованого виробництва є застосування групової технології. Особливість якої полягає в об'єднанні деталей у групи за загальними технологічними ознаками. Це дозволяє використовувати під час оброблення широку номенклатуру деталей, що випускаються невеликими партіями та є дуже ефективним в малосерійному та середньосерійному виробництві.

Використання гнучкої системи групування урізноманітнює види оброблюваних деталей

шляхом включення нових відповідно до номенклатури, що змінюється. Це дозволяє розширити жорсткі рамки типів деталей, швидко та успішно розбудовувати виробництво на якісно новому рівні [1].

Широке використання за умови організації групового виробництва зумовлене необхідністю підвищення продуктивності виробництва продукції машинобудування, яка набуває постійного вдосконалення та оновлення.

При вирішенні питання раціонального використання верстаного обладнання із числовим програмним керуванням (ЧПК): безсистемність відбору деталей, нестаток уніфікованих технологічних рішень щодо організації спеціальних робочих місць. Тому застосування системного групування деталей для їх оброблення в автоматизованому виробництві дозволяє усунути означені недоліки. У зв'язку з цим актуальним є питання скорочення термінів технологічної підготовки в частині формування груп деталей з урахуванням швидкої зміни номенклатури виробів в умовах гнучкого автоматизованого виробництва.

Мета дослідження – дослідити вплив чинників формування груп деталей на ефективність реалізації групового технологічного процесу, розроблення адаптованого до сучасних виробничих умов алгоритму групування за деталі-операціями із урахуванням завантажності верстатів.

Методи та методики дослідження. Для досягнення поставленої мети у роботі застосовано комплексний методологічний підхід, що поєднує теоретичні положення машинобудування, методи алгоритмізації та графічно-розрахунковий аналіз. Фундаментом дослідження є основні положення теорії групової технології та концепція гнучких автоматизованих виробничих систем. В основу методики покладено системний аналіз процесу технологічної підготовки виробництва, який розглядає групування деталей як багатокритеріальне завдання даних досліджень.

Результати. Питання організації технологічної підготовки автоматизованого виробництва з використанням методів групової технології розглядалися в роботах Є.С. Пуховського [1; 2]. Необхідно відмітити роботи [3; 4; 5], в яких розглядалися основи групування деталей та алгоритмізації процесів.

Значна частина інших робіт присвячена розгляду питань конструктивно-технологічної класифікації деталей, яка є основою вирішення багатьох завдань удосконалення конструкторської, технологічної, матеріальної та

організаційної підготовки групового виробництва [6; 7; 8; 9; 10]. Оцінюючи означені наукові праці, слід відзначити, що автори цих робіт розкривали окремі аспекти проблеми, локальний досвід підприємств, досягнуті результати та показники ефективності групових технологічних процесів.

За результатами проведеного аналізу наукових досягнень підсумовано, що сучасне машинобудування має достатній досвід з організації групового виробництва. Проте існуючі методи групування потребують постійного переглядання з метою удосконалення відповідно до вимог сучасного виробництва, створення нових матеріалів та удосконалення конструкцій, швидкозмінну багато-номенклатурність машинобудівної продукції. Таким чином, проектування групових технологій оброблення заготовок деталей є актуальним, тому потребує подальших наукових пошуків з питань підвищення ефективності групування деталей.

В умовах серійного виробництва значного зниження трудомісткості технологічного підготування виробництва можливо досягти за рахунок комплексного підходу до уніфікації прийнятих рішень на усіх етапах конструкторського та технологічного підготування виробництва.

Етап групування деталей є відповідальним і визначає подальшу ефективність групової технології. Тому розроблення алгоритму групування потребує аналізу повної бази даних, яка включає в себе змінну, умовно-постійну і постійну складові (рис. 1).

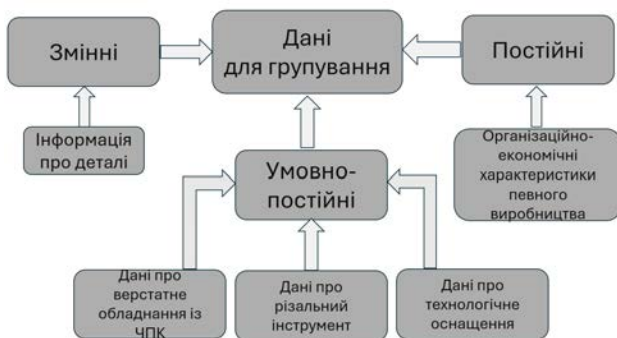


Рис. 1. Схема структури даних групування

Групову технологію характеризує спільність обладнання та технологічного оснащення при виконанні окремих технологічних операцій або при повному виготовленні групи різнотипних деталей. Такі ознаки є умовно-постійною складовою інформації у базі даних для процесу групування деталей.

Організаційно-економічні показники, які є постійною складовою бази даних, включають

у себе інформацію про трудові нормативи, економічні показники про використання виробничих площ, обладнання.

Змінна інформація містить дані про конструктивно-технологічні характеристики деталей, які підлягають групуванню при проектуванні групових технологічних процесів. Глибокий аналіз змінної інформації вагомо впливає на формування груп деталей.

Групування деталей за послідовністю дій розподіляється на попереднє – відбирання описів деталей за їх умовними позначеннями, та остаточне, яке здійснюється за результатами проектування технології для точного визначення складу груп. При формуванні груп деталей для оброблення у груповому технологічному процесі важливо враховувати інформацію про конструктивні та технологічні ознаки деталі. Саме при використанні групового методу технологічна класифікація превалює над конструкційною. Тому звернемо увагу на обмеження за технологічною ознакою при комплектуванні груп деталей.

Важливою технологічною ознакою є розмірна, оскільки вона у значному ступені визначає верстатне обладнання, розміри затискних пристосувань та спосіб установлення деталі у затискному пристосуванні. Маса деталі є впливовим чинником групування деталей, який впливає на час встановлення заготовки відповідно до використаних при цьому засобів автоматизації, обсяги оброблення.

Чинник затискного пристосування при групуванні деталей необхідно розглядати з позиції інформаційного поєднання схеми базування, розмірів і конструкційних особливостей. Для оброблення групи деталей, які мають спільні способи закріплення, проектується групові та універсально-наладнані пристосування. При цьому наявність змінних регульованих елементів та швидкодіючих затискувачів реалізує роботу одного пристосування для оброблення деталей різної конфігурації, забезпечуючи швидке і стійке встановлення усіх деталей групи.

Урахування чинника матеріалу деталі впливає на обґрунтування способу отримання заготовки, обрання матеріалу різального інструмента та призначення режимів різання. Поверхні заготовок повинні відповідати вимогам до оброблення на верстатах із ЧПК: не мати усадкових раковин, тріщин, значних макронерівностей. Тому при формуванні груп деталей бажано добирати заготовки одного рівня якості.

Ознака форми деталей визначає вид оброблення і також враховується у подальшому

розробленні деталеоперацій групового технологічного процесу, основними ознаками яких є оброблювані поверхні, верстат, пристосування, інструмент.

Вимоги щодо точності розмірів та шорсткості поверхонь деталей є вагомим показником при формуванні груп деталей. Враховуючи показник точності, треба зважати на точність отриманих розмірів і взаємного розташування оброблених поверхонь.

Проектування групових наладок комплектування деталей у групи має відбуватися з урахуванням інформаційної моделі формоутворюючої системи верстата із ЧПК та обмежень стосовно технологічних можливостей верстатів. Зважаючи на достатню оснащеність верстатів із ЧПК різальними інструментами та пристроями їхньої автоматичної зміни, чинник різального інструмента розглядається на етапі безпосереднього проектування детале-операцій.

Щодо чинника застосування верстатів із ЧПК зауважимо, що економічний ефект від їхнього використання вагомо залежить від рівня їх

використання, в тому числі від коефіцієнта та рівномірності завантаження. Рациональне використання машинного часу обладнання є одним із основних джерел економічної ефективності групової технології, спричиняє удосконалення організації виробництва та зменшує терміни виконання замовлень.

Тому етап вирішення проблеми забезпечення ефективності експлуатації верстата має бути включений до алгоритму групування деталей. Отже, при групуванні за детале-операціями необхідним є врахування таких техніко-економічних ознак як кількість та трудомісткість виконання технологічних операцій для кожної деталі для подальшого оцінювання рівномірності завантаженості та синхронізації роботи верстатного обладнання.

Розроблений алгоритм відпрацювання групового технологічного процесу за детале-операціями представлений на рис. 2.

При використанні запропонованого алгоритму проектування групового технологічного процесу (див. рис. 2) розроблено груповий технологічний

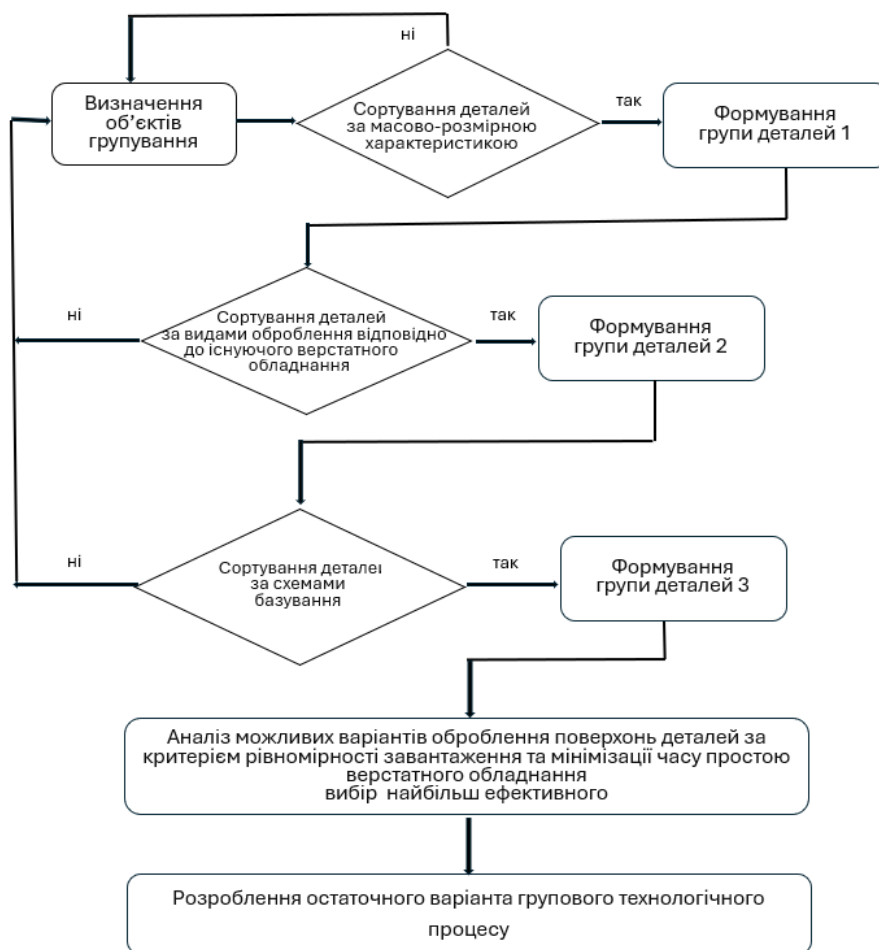


Рис. 2. Алгоритм групування деталей за детале-операціями з урахуванням завантаження обладнання

процес оброблення заготованок деталей, які відрізняються конструктивними характеристиками (рис. 3), що унеможливує формування комплексної деталі. Зважаючи на невелику кількість деталей, доцільним способом групування було обрано групування за деталю-операціями.

Аналіз деталей (див. рис. 3) було проведено за наступними ознаками: конструкція деталі, матеріал, габаритні розміри і маса, вид заготовки, вимоги щодо точності та якості поверхонь, види оброблення, розмір партії.

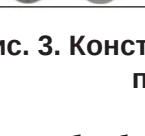
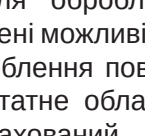
№	Вид деталі	Матеріал	Габаритні розміри, маса	Шорсткість поверхонь, точність розмірів	Розмір партії
1		сталь 30 ДСТУ 7809:2015	198x Ø 58 2,054 кг	Ra 1,6–Ra 6,3 Клас точності 6–12	210
2		сталь 30Л ДСТУ 8781:2018	Ø 90x16 0,65 кг	Ra 2,5–Ra 12,5 Клас точності 7–12	150
3		сталь 20 ДСТУ 7809:2015	50x50x44 0,4 кг	Ra 1,6–Ra 12,5 Клас точності 6–12	190
4		сталь 40Х ДСТУ 7809:2015	Ø 132x70 2,52 кг	Ra 1,6–Ra 12,5 Клас точності 6–12	110
5		сталь 45 ДСТУ 7809:2015	34,6x30x65 0,37 кг	Ra 2,5–Ra 12,5 Клас точності 7–12	140
6		СЧ 15 ДСТУ 8833:2019	Ø 150x75 2,5 кг	Ra 2,5–Ra 12,5 Клас точності 7–12	50

Рис. 3. Конструктивно-технологічні дані про деталі групи

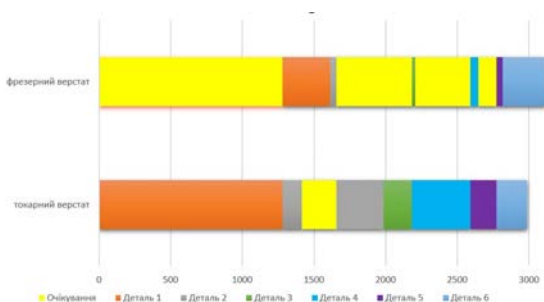
Для оброблення кожної поверхні деталі вивчені можливі варіанти видів та послідовності оброблення поверхонь, призначено відповідне верстатне обладнання, інструмент і оснастку, розрахований час оброблення. При цьому було враховано, що точність та шорсткість

заготованок для заданої групи деталей відповідає означеним вище обмеженням групової технології.

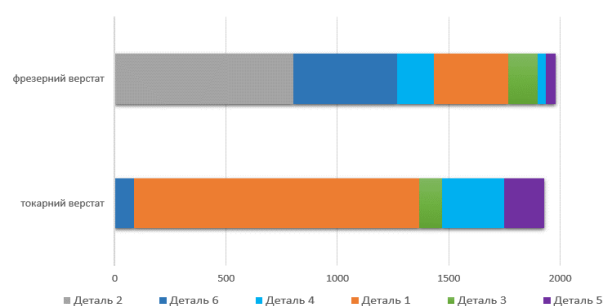
Зауважено, що деякі поверхні деталей можуть бути оброблені різними способами: точінням або фрезеруванням, розточуванням або обробленням осьовим інструментом. З урахуванням розширених технологічних можливостей сучасних верстатів із ЧПК реалізацію групової технології запропоновано на верстатах токарної та фрезерної груп. При розробленні першого варіанту групового технологічного процесу пріоритетність технологічних операцій визначалася за критерієм мінімального машинного часу, оброблення деталей розглядалося за порядком черги: оброблення деталі №1, №2 і т. д.

За результатами розрахунку машинного часу першого варіанту групової технології з урахуванням величини партії деталей з'ясовано нерівномірність завантаження верстатів (рис. 4, а): час простою токарного верстату склав 8% від загального часу роботи обладнання, фрезерного верстату – 74% від загального часу роботи обладнання.

Зважаючи на це, з метою скорочення часу простою фрезерного верстату та зменшення навантаження на токарний верстат, було здійснено перерозподіл деталюоперацій з урахуванням можливості забезпечення потрібної послідовності технологічних переходів. Чинник рівномірності завантаження верстатів враховано при розробленні другого варіанта групової технології. При цьому розглянуто можливість заміни оброблення точінням на фрезерування без шкоди для досягнення технічних вимог до деталей групи. Приклад розроблення двох варіантів технологічного процесу для деталі №6 наведено на рисунку 5. При розробленні другого варіанта значна частина технологічних переходів токарної операції замінені на альтернативний варіант оброблення на фрезерному



а)



б)

Рис. 4. Послідовність реалізації групового технологічного процесу: а) без урахування завантаженості верстатів; б) з урахуванням завантаженості верстатів

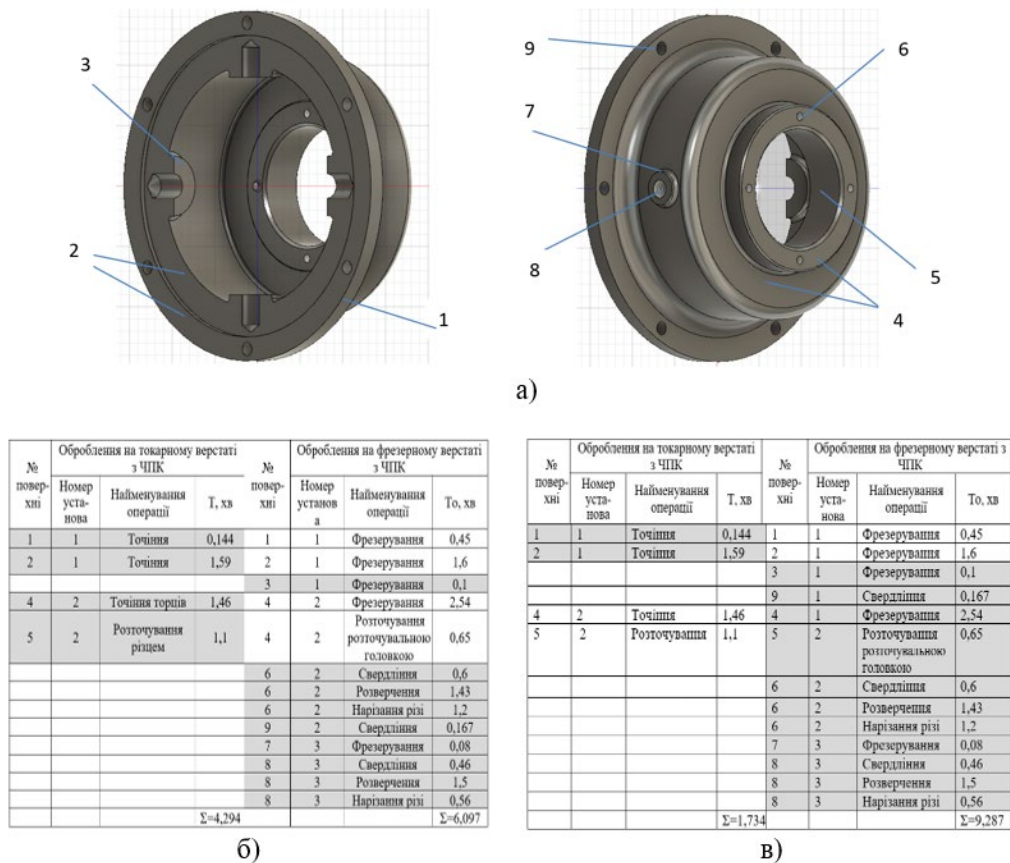


Рис. 5. Розроблення можливих варіантів послідовності оброблення поверхонь:
а) деталь; б) технологічний процес, розроблений за критерієм мінімізації машинного часу;
в) технологічний процес, розроблений за критерієм завантаженості верстатів

Порівняння часу роботи верстатів для двох варіантів групового технологічного процесу

	Час оброблення, хв.		Час простою, хв.		Загальний час сумісної роботи, хв.
	Токарний верстат, %	Фрезерний верстат, %	Токарний верстат, %	Фрезерний верстат, %	100%
Варіант 1	2744,65	921,52	243	2314,15	3122,32
Варіант 2	1930,19	1979,77	-	-	1979,77

верстаті із ЧПК. За рахунок цього перенесено технологічне завантаження з токарного на фрезерний верстат. Аналогічним чином було змінено технологічні процеси інших деталей. З орієнтацією на зменшення часу простою верстатів також було змінено послідовність подавання деталей.

Аналізуючи діаграму завантаженості верстатів варіанта альтернативного групового технологічного процесу після перерозподілу дета́леоперацій (рис. 4, б) видно, що після перерозподілу технологічного навантаження між токарним та фрезерним верстатами із ЧПК та зміною послідовності виконання дета́леоперацій було суттєво зменшено час простою

задіяного верстатного обладнання. Крім того, загальний час оброблення заготовок зменшено на 40%, час роботи токарного верстату із ЧПК зменшено на 30% (табл. 1).

Висновки. За результатами аналізу чинників впливу на ефективність групової технології розроблено алгоритм групування деталей за дета́леопераціями з урахуванням завантаження обладнання. Ефективність застосування алгоритму розглянута на прикладі формування структури групового технологічного процесу з урахуванням чинника рівномірності завантаженості верстатів. В результаті мінімізовано час простою верстатного обладнання та зменшено машинний час оброблення заготовок.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Пуховський Є. С. Технологічні основи гнучкого автоматизованого виробництва : навч. посіб. – К. : Вища школа. Головне вид-во, 1989. 240 с.
2. Пуховський Є. С., Малафєєв Ю. М. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування : навч. посібник. Ч. 1. К. : НТУУ «КПІ», 2017. 286 с.
3. Liu C. L., Wang J. Application of group technology in mechanical processing. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 109. P. 191–194. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.109.191>.
4. Wemmerlöv U., Hyer N. L. Cellular manufacturing in the U.S. industry: A survey of users. *International Journal of Production Research*. 1989. Vol. 27, No. 9. P. 1511–1530.
5. King J. R., Nakornchai V. Machine–component group formation in group technology: Review and extension. *International Journal of Production Research*. 1982. Vol. 20, No. 2. P. 117–133.
6. Марков А. М., Маркова М. І., Плетнєва Е. М. Алгоритм проектування групового технологічного процесу механічного оброблення деталей. *Оброблення металів*. 2012. № 4 (57). С. 5–9.
7. Надкєрнична Т. М., Лебєдєва О. О., Терєтьєв Є. О. Класифікація виробів машинобудівельної галузі за класифікатором ЄСКД промислової продукції. URL: <https://ng-kp.kpi.ua/files/Класификатор2019.pdf> (дата звернення: 10.11.2025).
8. Ariafar S., Ismail N. An improved genetic algorithm for multi-objective cell formation problem with production volume and machine load. *Computers & Industrial Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 347–362.
9. Paydar M. M., Saidi-Mehrabad M. A hybrid genetic–ant colony algorithm for designing cellular manufacturing systems under demand uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*. 2017. Vol. 109. P. 169–181.
10. Renna P., Ambrico M. Machine learning-based reconfiguration of cellular manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*. 2019. Vol. 53. P. 353–365.

REFERENCES:

1. Pukhovskiy, Ye. S. (1989). *Tekhnologichni osnovy hnuchkoho avtomatyzovanoho vyrobnystva* [Technological foundations of flexible automated production]. Vyshcha shkola. [in Ukrainian]
2. Pukhovskiy, Ye. S., & Malafiev, Yu. M. (2017). *Design of flexible manufacturing systems in mechanical engineering: Part 1*. – Kyiv: NTUU «KPI». [in Ukrainian]
3. Liu, C. L., & Wang, J. (2011). Application of group technology in mechanical processing. *Applied Mechanics and Materials*, 109, 191–194. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.109.191>.
4. Wemmerlöv, U., & Hyer, N. L. (1989). Cellular manufacturing in the U.S. industry: A survey of users. *International Journal of Production Research*, 27(9), 1511–1530.
5. King, J. R., & Nakornchai, V. (1982). Machine–component group formation in group technology: Review and extension. *International Journal of Production Research*, 20(2), 117–133.
6. Markov, A. M., Markova, & M. I., Pletniova, E. M. (2012). Algorithm for designing a group technological process of mechanical machining of parts. *Metal Processing*, 4 (57), 5–9. [in Ukrainian]
7. Nadkernychna, T. M., Lebedeva, O. O., & Terentiev, Ye. O. (2019). Classification of machine-building products according to the ESKD industrial product classifier. <https://ng-kp.kpi.ua/files/Класификатор2019.pdf> (accessed: 10.11.2025). [in Ukrainian]
8. Ariafar, S., & Ismail, N. (2016). An improved genetic algorithm for multi-objective cell formation problem with production volume and machine load. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 347–362.
9. Paydar, M. M., & Saidi-Mehrabad, M. (2017). A hybrid genetic–ant colony algorithm for designing cellular manufacturing systems under demand uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 169–181.
10. Renna, P., & Ambrico, M. (2019). Machine learning-based reconfiguration of cellular manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 353–365.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 17.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 620.178.35

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-19>

МЕТАЛОГРАФІЧНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ ТРАНСПОРТНОЇ ЦИСТЕРНИ ПІСЛЯ БАГАТОРІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В УМОВАХ ІНТЕНСИВНИХ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Бурлуцький Олексій Вікторович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском

Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

ORCID ID: 0000-0003-1902-5809

У статті представлено результати металографічного дослідження впливу інтенсивних динамічних навантажень (вібрацій, ударних імпульсів, гідродударів, а також циклічних змін тиску під час маневрових робіт та гальмування) на мікроструктуру сталі котла транспортної цистерни після тривалої експлуатації (понад 30 років). Метою роботи було встановлення кількісних закономірностей деградації ферито-перлітної сталі 09Г2С в основному металі та зоні термічного впливу зварних швів, а також розробка науково обґрунтованих критеріїв для прогнозування залишкового ресурсу. Використано комплекс взаємодоповнюючих методів: оптичну та електронну мікроскопію, мікродюрOMETРИЧНИЙ аналіз, кількісну металографію з визначенням об'ємної частки перліту та розміру феритного зерна, а також математичне моделювання дифузійних процесів. Експериментально встановлено, що в зоні термічного впливу частка перліту зменшується на 35–50%, мікротвердість підвищується до 175 HV, а розмір феритного зерна зростає до 28–35 мкм порівняно з основним металом (20–24 мкм). Розроблено математичні моделі, що описують зв'язок динамічних параметрів із мікроструктурними змінами: модифіковане рівняння Холла–Петча для оцінки межі текучості залежно від розміру зерна, залежність мікротвердості від кількості ударних імпульсів, рівняння дифузійного перерозподілу вуглецю (сфероїдизація перліту) та інтегральний критерій структурної деградації S_d , який враховує зміну трьох ключових параметрів: розміру зерна, об'ємної частки перліту та мікротвердості. Показано високу кореляцію ($R^2 = 0,91$) між параметром S_d та залишковим ресурсом котла, визначеним за нормативною методикою. Запропоновано аналітичний вираз для прогнозування залишкового ресурсу $R_{res} = R_0 \exp(-k S_d)$, де $R_0 = 32$ роки, $k = 2,8$. Доведено, що макроскопічно незмінний метал може мати суттєві мікроструктурні пошкодження ($S_d \geq 0,3$), що потребує обов'язкового металографічного контролю при подовженні терміну служби цистерн.

Отримані результати є науковим підґрунтям для переходу від календарного планування ремонтів до стратегії технічного обслуговування за фактичним станом металу, що дозволяє підвищити безпеку залізничних перевезень, запобігти раптовим втомним руйнуванням та зменшити невиправдані експлуатаційні витрати на заміну котлів.

Ключові слова: транспортна цистерна, динамічні навантаження, металографічна оцінка, мікроструктура сталі 09Г2С, сфероїдизація перліту, зона термічного впливу, залишковий ресурс, математичне моделювання.

Burlutskyi Oleksii. Metallographic assessment of the degradation of structural steel in a transport tank following many years of service under conditions of intense dynamic loading

The article presents the results of a metallographic study of the influence of intense dynamic loads (vibrations, shock pulses, hydrodynamic impacts, as well as cyclic pressure changes during shunting operations and braking) on the steel microstructure of a transport tank boiler after long-term operation (over 30 years). The aim of the work was to establish quantitative patterns of degradation of ferrite-pearlite steel 09G2S in the base metal and the heat-affected zone of welded joints, as well as to develop scientifically substantiated criteria for predicting the residual life. A set of complementary methods was used: optical and electron microscopy, microhardness analysis, quantitative metallography to determine the volume fraction of pearlite and the ferrite grain size, as well as mathematical modelling of diffusion processes. It has been experimentally established that in the heat-affected zone, the pearlite fraction decreases by 35–50%, the microhardness increases to 175 HV, and the ferrite grain size increases to 28–35 μm compared to the base metal (20–24 μm). Mathematical models describing the relationship between dynamic parameters and microstructural changes have been developed: a modified Hall–Petch equation for estimating the yield strength depending on the grain size, a dependence of microhardness on the number of shock impulses, an equation for the diffusion redistribution of carbon (pearlite spheroidisation), and an integral criterion of structural degradation S_d , which takes into account changes in three key parameters: grain size, volume fraction of pearlite, and microhardness. A high correlation ($R^2 = 0.91$) between the S_d parameter and the residual life of the boiler, determined according to the standard procedure, is shown. An analytical expression for predicting the residual life $R_{res} = R_0 \exp(-k S_d)$ is proposed, where $R_0 = 32$ years, $k = 2.8$. It is proved that macroscopically unchanged metal may have significant microstructural damage ($S_d \geq 0.3$), which requires mandatory metallographic control when extending the service life of tanks.

The obtained results provide a scientific basis for the transition from scheduled maintenance planning to a strategy of maintenance based on the actual condition of the metal, which makes it possible to increase the safety of railway transport, prevent sudden fatigue failures, and reduce unjustified operating costs for boiler replacement.

Key words: transport tank, dynamic loads, metallographic assessment, 09G2S steel microstructure, pearlite spheroidization, heat-affected zone, residual life, mathematical modeling.

Актуальність дослідження. Надійність транспортних цистерн є критичним фактором безпеки під час перевезення небезпечних та наливних вантажів залізничним і автомобільним транспортом. Експлуатація котлів цистерн супроводжується інтенсивними динамічними навантаженнями, що виникають при маневрових роботах, гальмуванні та вібраціях. Постійна зміна напруженого стану металу призводить до накопичення втомних пошкоджень у структурі матеріалу. Традиційні методи розрахунку міцності часто не враховують мікроструктурні зміни, що відбуваються в сталі під дією ударних імпульсів. Металографічна оцінка дозволяє виявити деградацію матеріалу на ранніх стадіях, що є надзвичайно актуальним для запобігання аваріям. Проблема старіння парку цистерн вимагає нових підходів до оцінки їхнього залишкового ресурсу. Динамічні навантаження провокують локальну пластичну деформацію, яка візуалізується через зміну зеренної структури. Вплив гідродинамічних ударів всередині котла створює додаткові зони концентрації напружень. Дослідження мікротріщин та дислокаційної субструктури є ключовим для розуміння механізмів руйнування.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення техногенної безпеки транспортних процесів. Сучасні вимоги до екологічності перевезень роблять неприпустимими будь-які витoki через розгерметизацію котлів. Металографія дає пряму відповідь на питання про якість зварних з'єднань під впливом вібрацій. Розвиток швидкісного руху на залізниці збільшує амплітуду динамічних впливів на конструкцію. Недостатня вивченість зв'язку між макроскопічним навантаженням та мікроструктурною відповіддю металу створює наукову лаку. Застосування сталей нових марок потребує верифікації їхньої стійкості до циклічних ударів. Економічні збитки від аварій цистерн значно перевищують витрати на їхню поглиблену діагностику. Аналіз деградації структури металу є фундаментом для створення систем моніторингу в реальному часі.

Вивчення фазового складу в зонах термічного впливу допомагає оптимізувати технологію виготовлення котлів. Вплив корозійно-активних середовищ у поєднанні з динамікою прискорює руйнування. Визначення критичних точок зносу дозволяє подовжити термін експлуатації рухомого складу. Стандарти безпеки постійно оновлюються, що вимагає нових експериментальних даних. Детальна металографія дозволяє ідентифікувати крихке та в'язке руйнування на мікрорівні. Використання сучасних мікроскопів

підвищує точність прогнозування довговічності. Створення математичних моделей без урахування реальної структури металу є неповним. Актуальність підсилюється необхідністю імпортозаміщення та розробки вітчизняних методик контролю. Врахування динамічного фактора є обов'язковим для сертифікації нових типів тари. Дослідження механічних властивостей після тривалої експлуатації показує значне відхилення від паспортних даних. Металографічний аналіз є об'єктивним методом верифікації технічного стану. Проблема втомного руйнування металу під дією змінного тиску рідини залишається гострою. Динаміка руху поїзда створює складний спектр коливань, що діють на стінки котла. Розуміння фізики процесів на межі зерен дозволяє керувати властивостями матеріалу. Наукова спільнота потребує систематизованих даних про вплив ударних навантажень на перлітно-феритну структуру. Актуальність підтверджується статистикою відмов несучих конструкцій цистерн. Впровадження результатів дослідження дозволить знизити ризик екологічних катастроф. Аналіз текстури металу після навантаження виявляє приховані дефекти прокату. Розробка критеріїв граничного стану на основі металографії є пріоритетним завданням. Дослідження сприяє розвитку теорії міцності та надійності складних технічних систем. Кожен випадок руйнування котла потребує глибокої експертизи мікроструктури. Робота має пряме відношення до національної безпеки в галузі транспорту. Сучасна наука вимагає переходу від візуального огляду до структурного аналізу. Взаємодія динамічних сил та дефектів кристалічної решітки є складною міждисциплінарною задачею. Актуальність теми не викликає сумнівів у світлі глобалізації вантажних потоків. Результати стануть основою для нових методичних вказівок з ремонту цистерн. Оцінка впливу динаміки на котел є стратегічно важливим кроком для інженерії.

Аналіз літератури. У роботі [1] досліджено навантаження на несівну конструкцію вагона-цистерни під час перевезення залізничним поромом. Авторами враховано специфічні морські динамічні впливи, зокрема хвильові коливання та інерційні сили. Запропонована математична модель дозволяє оцінити напружено-деформований стан конструкції в умовах комбінованих навантажень. Результати показали суттєве зростання навантажень порівняно зі стандартними умовами експлуатації. Практична цінність полягає у можливості підвищення міцності та надійності вагонів при мультимодальних перевезеннях.

У публікації [2] розглянуто динамічне навантаження вагона-цистерни з піддатливими зв'язками між котлом і рамою. Дослідження спрямоване на зменшення пікових напружень шляхом використання адаптивних конструктивних елементів. Авторами побудовано розрахункову модель з урахуванням нелінійних характеристик зв'язків. Отримані результати свідчать про ефективність таких рішень у зниженні динамічних навантажень.

У статті [3] представлено метод оцінки втомної надійності рами локомотива на основі вимірюваних і віртуальних деформацій. Запропоновано поєднання експериментальних даних із чисельним моделюванням. Це дозволяє більш точно визначати ресурси конструкцій при змінних навантаженнях. Авторами доведено високу кореляцію між реальними та розрахунковими напруженнями. Методика може бути застосована для прогнозування довговічності рухомого складу.

У роботі [4] досліджено способи продовження терміну служби вантажних вагонів. Основна увага приділена модернізації конструкцій та вдосконаленню систем технічного обслуговування. Запропоновано комплекс заходів, що включає діагностику та ремонт. Результати підтверджують можливість суттєвого підвищення експлуатаційної ефективності.

У статті [5] досліджено вплив згинальних деформацій кузова вагона на взаємодію з колією. Автори розробили математичну модель взаємодії «вагон–колія». Встановлено, що деформації кузова можуть суттєво впливати на динамічні сили контакту. Це, у свою чергу, впливає на безпеку руху.

У дослідженні [6] розглянуто застосування ZnO-допованих ПАММ-матеріалів для покращення асфальту та антикорозійного захисту. Запропоновані покриття демонструють високі антикорозійні властивості. Проведено експериментальні дослідження фізико-хімічних характеристик матеріалу. Результати показали підвищення довговічності дорожніх покриттів.

У оглядовій статті [7] проаналізовано імпульсну катодну захисту трубопроводів. Розглянуто сучасні підходи та технологічні рішення у цій сфері. Визначено основні переваги імпульсного струму порівняно з традиційними методами.

У публікації [8] досліджено стійкість автопоїзда з частково заповненою цистерною. Основну увагу приділено впливу переміщення рідини на динаміку руху. Розроблено модель, що враховує ефекти слошингу. Результати показали зниження стійкості при певних режимах руху. Це має важливе значення для безпеки перевезень.

У роботі [9] виконано оцінку втомної міцності котла вагона-цистерни з урахуванням корозійного зносу. Запропоновано методіку врахування деградації матеріалу у розрахунках. Отримані результати показали значне зниження ресурсу при наявності корозії. Проведено аналіз напруженого стану конструкції.

У статті [10] досліджено зниження енергоспоживання поїздів шляхом зменшення маси вагонів. Запропоновано аналітичну модель руху поїзда. Результати показали суттєву економію енергії при зменшенні маси. Автор обґрунтовує доцільність оптимізації конструкції вагонів.

У дослідженні [11] проведено оцінку динаміки вантажного вагона з урахуванням в'язкого демпфування. Розроблено математичну модель руху. Встановлено вплив демпфування на зниження коливань. Результати підтверджують підвищення плавності руху. Робота має практичне значення для проєктування підвіски.

У статті [12] проаналізовано бічні сили для оцінки безпеки проти сходження з рейок. Розглянуто спеціалізований поїзд для перевезення довгомірних рейок. Виконано чисельне моделювання навантажень. Встановлено критичні режими руху.

У публікації [13] досліджено динаміку рейкового транспортного засобу на реальній моделі колії. Використано експериментальні та чисельні методи. Оцінено показники плавності ходу. Результати дозволяють покращити параметри рухомого складу.

У роботі [14] досліджено гідродинаміку течії у плоскому каналі зі змінною в'язкістю. Розглянуто вплив граничних умов на розподіл швидкостей. Запропоновано математичну модель течії. Результати мають теоретичне значення для механіки рідин.

У статті [15] проаналізовано динаміку вантажних вагонів при боковому зміщенні візка. Досліджено вплив цього явища на стійкість руху. Запропоновано модель для оцінки динамічних параметрів. Встановлено критичні умови експлуатації.

У дослідженні [16] розглянуто пошкоджуваність та тріщиностійкість вагонів-цистерн. Запропоновано підхід до аналізу толерантності до пошкоджень. Виконано оцінку розвитку тріщин у конструкції. Результати сприяють підвищенню безпеки експлуатації.

Проведений аналіз науково-технічної літератури дозволив встановити, що більшість існуючих праць зосереджені на загальних розрахунках міцності котлів цистерн без детального вивчення структурних змін металу. Дослідники переважно приділяють увагу макроскопічним

деформаціям та напруженому стану конструкцій, залишаючи поза увагою мікроструктурні трансформації. Зокрема, металографічна оцінка впливу динамічних навантажень на котел транспортної цистерни висвітлена фрагментарно та не має системного характеру. Відсутні чіткі кореляційні залежності між параметрами ударних впливів та зміною параметрів зеренної структури сталей.

Питання деградації металу в зонах зварних з'єднань під дією вібраційних навантажень потребують глибшого експериментального підтвердження. Більшість публікацій базуються на статичних моделях, які не відображають реальних умов експлуатації рухомого складу. Таким чином, можна стверджувати, що даній проблематиці не приділено достатньої уваги, що зумовлює необхідність проведення цього дослідження.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення цілісності котлів транспортних цистерн у процесі експлуатації є однією з ключових у транспортній галузі. Сучасні умови перевезень характеризуються зростанням швидкостей та інтенсивності динамічних впливів на конструктивні елементи. Внаслідок постійних ударних та вібраційних навантажень у металі котла накопичуються незворотні структурні зміни. Основна складність полягає в тому, що ці зміни відбуваються на мікроскопічному рівні і не фіксуються звичайними методами технічного огляду. Відсутність об'єктивної інформації про стан мікроструктури призводить до раптових руйнувань металу, навіть якщо діючі напруження не перевищують межі текучості. Існуючі методики оцінки ресурсу часто ігнорують динамічну складову як фактор прискореної деградації матеріалу. Виникає гостра суперечність між потребою у подовженні терміну експлуатації цистерн та ризиками, пов'язаними з втомним руйнуванням металу. Наукова проблема полягає у відсутності комплексного підходу до металографічної оцінки стану сталей після динамічних впливів. Необхідно встановити механізми зародження мікротріщин у специфічних зонах котла під дією гідроударів та маневрових сил. Важливим аспектом є також неоднорідність властивостей металу в основі та у зварних швах при циклічному навантаженні. Потребує вирішення питання ідентифікації критичних ознак зносу структури, що передують катастрофічному руйнуванню. Таким чином, розробка науково обґрунтованої системи металографічного контролю є нагальною проблемою для забезпечення безпеки транспорту.

Методи та методики дослідження Метою дослідження є встановлення закономірностей

зміни мікроструктури металу котла транспортної цистерни під впливом інтенсивних динамічних навантажень для підвищення точності оцінки його технічного стану. На основі отриманих даних планується розробити критерії металографічної діагностики, що дозволять прогнозувати залишковий ресурс конструкції. Кінцевою ціллю є наукове обґрунтування заходів щодо запобігання втомним руйнуванням та підвищення надійності експлуатації цистерн.

Об'єктом дослідження є процес деградації та руйнування матеріалу транспортної цистерни в умовах інтенсивного динамічного навантаження.

Предметом дослідження є мікроструктурні зміни, фазові трансформації та механізми накопичення пошкоджень у сталі цистерни під впливом ударних та вібраційних сил.

В роботі вивчаються закономірності формування дефектів структури на різних стадіях експлуатації.

Особлива увага приділяється зв'язку між параметрами динаміки та показниками металографічного аналізу.

Методика металографічного аналізу. Для проведення металографічного аналізу та визначення механічних властивостей зварних з'єднань було взято три вагони-цистерни, які пройшли понад тридцятирічну експлуатацію і згідно з нормативно-технічною документацією були визнані такими, що відслужили свій строк.

Підготовку шліфів проводили таким чином, щоб не порушити структурний стан у зварних з'єднаннях, який склався на момент виконання досліджень. У роботі проаналізовано мікроструктуру зразків згідно з технічною документацією, листи сталі 09Г2С постачають або в гарячекатаному, або в термообробленому стані після нормалізації. Нормалізація (охолодження металу на повітрі з температури вище критичної точки) може виконуватися з прокатного нагріву за умови, що температура кінця прокатки не нижча за регламентований рівень («контрольована прокатка»). У такому стані низьковуглецеві сталі розглянутого типу мають ферито-перлітну структуру.

У сталях перлітного класу, до яких належить сталь 09Г2С, можуть спостерігатися такі форми структурної нестабільності:

- сфероїдизація перліту та коагуляція (укрупнення) частинок карбідної фази;
- дифузійне перерозподілення вуглецю в об'ємі феритної матриці у напрямку меж зерен та інших місць структурної неоднорідності;
- перетворення в карбідній фазі та зміна складу твердого розчину фериту, пов'язані

з перерозподілом вуглецю та легуючих елементів між феритом і карбідами;

- зміна дислокаційної структури фериту;
- сегрегація домішкових елементів, насамперед фосфору, у фериті.

Для цього за стандартною методикою виготовлено мікрошліфи, які після механічного шліфування та полірування протравлювали в 4%-му спиртовому розчині HNO_3 [17]. Мікροструктуру переглядали та аналізували на різних ділянках зразків для забезпечення репрезентативності результатів. Дослідження з фотофіксацією виконано за допомогою оптичної та електронної мікроскопії, що дозволило вивчити мікροструктуру на різних рівнях (від загального вигляду до субструктури фериту та карбідних частинок) після комплексу обробок. За графіками розподілу мікротвердості (виміряної з кроком 0,2–0,5 мм по перерізу зварних з'єднань) та візуальними даними мікροструктурного аналізу оцінено вплив кожного етапу обробки на структурний стан матеріалу. Вимірювання та фотографування проводили на мікроскопах MIM 7 та ZEISS AXIO Vert. A1 рис. 1 з використанням цифрових камер з роздільною здатністю не менше 5 Мп, що забезпечило можливість детального аналізу мікροструктурних змін на різних масштабних рівнях.

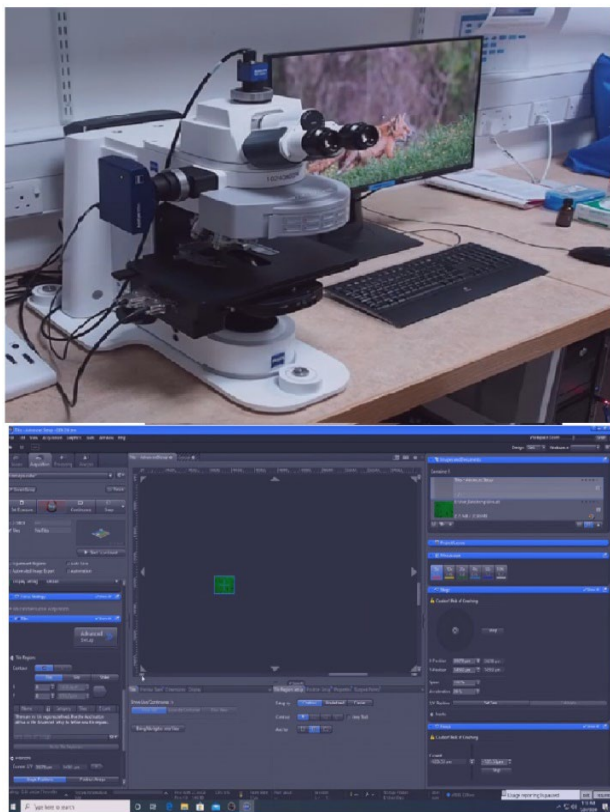


Рис. 1. Загальний вигляд мікроскопа ZEISS AXIO Vert. A1

Принцип роботи металографічного мікроскопу ZEISS AXIO Vert. A1 схожий на роботу мікроскопу MIM 7, оскільки він також заснований на принципі відбиття світла від поверхні шліфа, що досліджується. Проте мікроскоп ZEISS є значно сучасніший і, відповідно, має вмонтовану відеокамеру з можливістю виведення зображення на монітор комп'ютеру, та збереження його в цифровому вигляді.

Дослідження мікροструктури основного металу показало, що всі деталі рами вагона були виготовлені з металопрокату, який мав дрібнозернисту ферито-перлітну будову зі слабко вираженою смугастістю. Згідно з хімічним аналізом, для виготовлення вузлів рами застосовувалася маловуглецева сталь Ст3 спокійного плавлення табл. 1.

Вирізання темплетів для металографії та зразків для визначення залишкових механічних властивостей здійснювали за схемами, наведеними на рис. 2 та 3.

Схема відбору рисунок 2 зразків для рентгеноструктурного та металографічного аналізів і визначення механічних властивостей:

1, 3, 11, 23 – основний метал балки шкворневої;

9, 10, 13, 17, 18, 22 – основний метал балки хребтової;

2, 4, 6, 8, 15, 19 – таврові з'єднання вертикальних, верхніх та нижніх листів балки шкворневої;

12, 20 – таврове з'єднання обмежувача опори з листами балки шкворневої;

14, 16 – нахльостні з'єднання нижнього та верхнього листів балки хребтової та полиці швелера;

21 – нахльостне з'єднання підсилення до нижнього листа балки хребтової в зоні отвору;

5, 7 – таврове з'єднання вертикального листа балки шкворневої та полиці балки хребтової.

Математичне моделювання впливу динамічних навантажень на мікροструктуру. Для кількісного опису зв'язку між динамічними навантаженнями та структурними змінами металу котла використано такі математичні співвідношення. Зв'язок напружень із розміром феритного зерна (рівняння Холла–Петча) [17].

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

де σ_y – межа текучості (МПа); $\sigma_0 = 65$ МПа – напруження тертя для сталі 09Г2С; $k_y = 0.65$ МПа·мм^{1/2} – коефіцієнт блокування дислокацій; d – середній діаметр феритного зерна (мм).

Зв'язок мікротвердості з кількістю ударних імпульсів

Таблиця 1

Хімічний склад сталей основних вузлів рами та котла досліджуваних вагонів-цистерн

№ з/п	Деталі вагона-цистерни	Хімічний склад, %					
		С	Mn	Si	S	P	Марка сталі
1.	Рама вагона № 1	0,15	0,55	0,16	0,04	0,04	СтЗсп
2.	Рама вагона № 2	0,16	0,65	0,17	0,04	0,04	СтЗсп
3.	Котел № 1	0,16	0,52	0,06	0,04	0,04	СтЗсп
4.	Котел №2	0,12	1,40	0,52	0,03	0,03	09Г2С

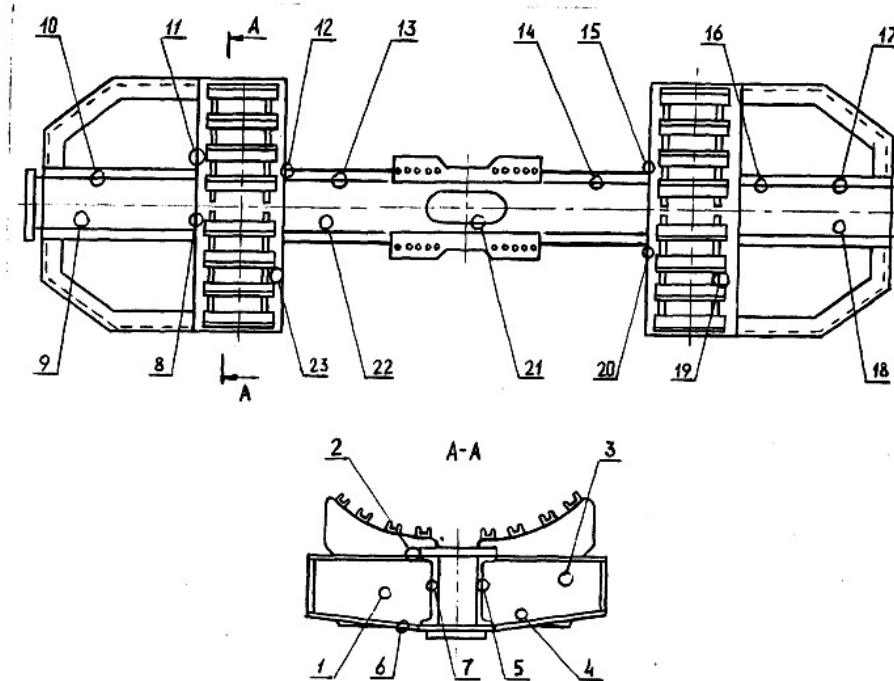


Рис. 2. Несівна рама вагона-цистерни для перевезення небезпечних вантажів до модернізації

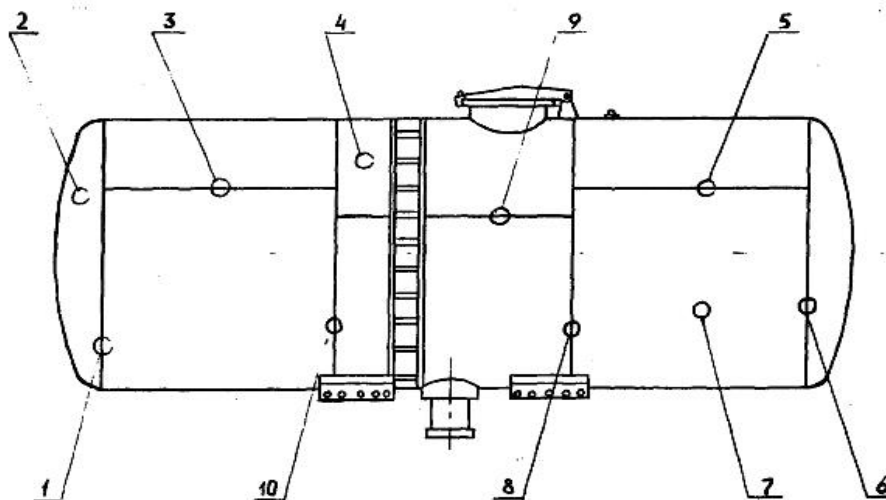


Рис. 3. Котел вагона-цистерни для перевезення небезпечних вантажів до модернізації.
 1, 6 – стикові з'єднання обичайок з днищами; 3, 5, 9 – стикові з'єднання карт обичайок;
 8, 10 – стикові з'єднання обичайок між собою; 2, 4, 7 – основний метал котла

$$H_{\mu} = H_0 + \beta \cdot \log(N_{\text{imp}}) \quad (2)$$

де H_{μ} – мікротвердість (HV); H_0 – початкова мікротвердість; β – емпіричний коефіцієнт (для сталі 09Г2С $\beta \approx 12$ HV); N_{imp} – кількість значущих динамічних імпульсів за період експлуатації.

Дифузійний перерозподіл вуглецю (сфероїдизація перліту)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{eff}}(T) \cdot \nabla^2 C \quad (3)$$

з ефективним коефіцієнтом дифузії

$$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

де c – концентрація вуглецю; $D_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $Q \approx 180$ кДж/моль; R – газова стала; T – температура в зоні термічного впливу.

Інтегральний критерій структурної деградації [17].

$$S_d = w_1 \cdot \frac{d_0 - d}{d_0} + w_2 \cdot \frac{V_{p0} - V_p}{V_{p0}} + w_3 \cdot \frac{H_{\mu} - H_{\mu 0}}{H_{\mu 0}} \quad (5)$$

де S_d – параметр структурного пошкодження (0 – новий стан, 1 – граничний);

$d_0, V_{p0}, H_{\mu 0}$ – початкові значення;

V_p – об'ємна частка перліту (%);

w_i – вагові коефіцієнти ($w_1 = 0.4, w_2 = 0.4, w_3 = 0.2$ за результатами калібрування).

На відміну від рами вагона, зварні з'єднання котла характеризуються вищою якістю, оскільки для їх виконання застосовувалася двостороннє автоматичне зварювання під шаром флюсу. При ретельному вивченні зразків, вирізаних з кільцевих та поздовжніх швів котла, видимих зовнішніх і внутрішніх дефектів наплавленого металу та зони термічного впливу виявлено не було.

Тим часом зона термічного впливу на ділянці перегріву характеризується укрупненням зерном з наявністю відносно великих виділень фериту, що утворюють сітку по межах зерен перліту.

Кількісна металографічна оцінка параметрів мікроструктури

Для різних зон котла вагона-цистерни (основний метал, зона термічного впливу, метал шва) визначено такі усереднені значення:

Зона котла	d , мкм	H_{μ} , HV	V_p , %
Основний метал (днище)	18–22	145–155	22–25
Основний метал (обечайка)	20–24	140–150	20–23
Зона термічного впливу (ЗТВ)	28–35	160–175	12–16
Метал шва	25–30	170–185	10–14

У ЗТВ спостерігається зменшення частки перліту на 35–50% порівняно з основним металом, що свідчить про сфероїдизацію цементиту під дією динамічних навантажень. Мікротвердість у шві підвищена через наклеп та виділення карбідів по межах зерен.

Прогнозування залишкового ресурсу за структурними параметрами

На основі проведених досліджень запропоновано аналітичний вираз для прогнозування залишкового ресурсу котла транспортної цистерни:

$$R_{\text{res}} = R_0 \cdot \exp(-k \cdot S_d) \quad (6)$$

де $R_0 = 32$ роки – нормативний ресурс нового котла (для сталі 09Г2С), $k = 2.8 \pm 0.3$ – константа деградації (визначена експериментально за результатами металографії зразків після 30 років експлуатації), S_d – інтегральний параметр структурного пошкодження (0...1). Вираз (7) дозволяє перейти від календарного строку служби до об'єднаного прогнозу за фактичним станом мікроструктури, що підвищує безпеку експлуатації та зменшує невиправдані витрати на заміну котлів.

Кореляція інтегрального критерію деградації із залишковим ресурсом

На основі експериментальних значень d , H_{μ} , V_p для кожної дослідної зони котла розраховано параметр структурного пошкодження S_d за рівнянням (6). Встановлено, що для основного металу $S_d = 0.12 \dots 0.18$, для зони термічного впливу $S_d = 0.35 \dots 0.42$, для металу шва $S_d = 0.28 \dots 0.33$.

Порівняння з даними про залишковий ресурс визначеним за [18] показало високий коефіцієнт кореляції ($R^2 = 0.91$):

$$R_{\text{res}} = 24.5 \cdot \exp(-3.2 \cdot S_d) \cdot (\text{років})$$

Це підтверджує, що S_d є об'єктивним предиктором втомної деградації сталі 09Г2С. Зони з $S_d > 0.4$ потребують першочергового неруйнівного контролю. Отримані результати усувають суперечність, виявлену в літературі: макроскопічно метал може виглядати незмінним, однак мікроструктурні зміни ($S_d \geq 0.3$) вже відбуваються.

Результати та дискусії. Експериментально доведено ефективність запропонованих заходів щодо зміцнення критичних зон котла. Науково об'єднано перехід до стратегії обслуговування за фактичним станом мікроструктури металу. Практична реалізація висновків забезпечить значне підвищення надійності та безпеки залізничних і автомобільних перевезень.

Отримані дані свідчать про те, що динамічні навантаження призводять до вираженої

анізотропії структури металу в найбільш напружених зонах котла. Під час обговорення результатів було відзначено, що зони термічного впливу зварних швів є найбільш вразливими до формування мікротріщин під дією вібрацій. Встановлено, що мікротвердість металу зростає пропорційно інтенсивності динамічного впливу, що свідчить про процеси наклепу.

Порівняння мікроструктури нових та експлуатованих котлів підтверджує накопичення пошкоджень на межах зерен фериту. Зафіксовано появу специфічних смуг ковзання, що є передвісником втомного руйнування. Підтверджено гіпотезу про те, що гідродинамічні удари всередині цистерни створюють умови для локальної пластичної течії металу.

Висновки. Таким чином, проведене вивчення мікроструктури сталі дозволяє зробити висновок, що в процесі експлуатації матеріал зазнав певних структурних змін, які полягають у значному зменшенні кількості перлітної складової за рахунок сфероїдизації цементиту, його розчинення та дифузійного переміщення з виділенням і подальшою коагуляцією карбідів на межах феритних зерен, що макроскопічно виглядає як незмінний метал, однак мікроструктурно фіксуються чіткі ознаки деградації; водночас результати макро- та мікроскопічних досліджень елементів котла дають підставу стверджувати, що, незважаючи на тривалу експлуатацію, у структурі основного металу, металу шва та зони термічного впливу видимих змін не відбулося, а структура залишається однорідною, типовою для даного способу зварювання та даної марки сталі.

Отже, якщо загалом підсумувати отримані результати макро- та мікроаналізу, можна відзначити таке:

1. Основний метал як елементів рами вагонів, так і котла, у процесі тривалої експлуатації не зазнав видимих структурних змін і за структурним станом може й надалі експлуатуватися в колишніх режимах.

2. Зварні з'єднання котла за структурою металу шва та навколошовної зони цілком відповідають вимогам, що ставляться до конструкцій даного призначення.

3. У процесі тривалої експлуатації в найбільш напружених зварних з'єднаннях рами

відбувається процес зародження та поступового розвитку мікротріщин, небезпечних для роботи вагона в цілому.

Осередками зародження втомних мікротріщин є початкові дефекти зварного шва, такі як підрізи, несплавлення та непровари в корені шва.

4. Для своєчасного виявлення втомних макро- та мікротріщин у зварних швах рами вагона та для запобігання можливому аварійному руйнуванню її вузлів необхідно періодично, не рідше ніж 1 раз на 10 років, проводити їх діагностику.

5. З метою підвищення якості зварних з'єднань рами вагона та усунення осередків зародження втомних макро- та мікротріщин, таких як непровари кореня шва, несплавлення, підрізи та інші дефекти, рекомендувати впровадження у технологічний процес виготовлення та модернізації рами неруйнівного контролю найбільш навантажених зварних швів.

Комплексна металографічна оцінка підтвердила вирішальну роль динамічних навантажень у процесі передчасної деградації металу котлів цистерн. Встановлено, що тривала експлуатація в умовах вібрацій спричиняє подрібнення зерен та зміну фазового складу сталі. Виявлено, що найбільш небезпечні мікроструктурні зміни локалізуються в нижній частині котла та поблизу зварних швів торцевих днищ.

4. Підтверджено пряму залежність між амплітудою динамічних ударів та швидкістю росту втомних мікротріщин.

5. Металографічний аналіз дозволив ідентифікувати зони з аномально високою щільністю дефектів, які є потенційними осередками руйнування.

6. Доведено, що зміна мікротвердості може слугувати непрямим індикатором вичерпання ресурсу пластичності матеріалу.

7. Розроблено шкалу структурних станів металу, що дозволяє класифікувати рівень зносу котла за візуальними ознаками мікрошліфів.

8. Встановлено, що стандартні методи контролю без металографії не дають повної картини технічного стану конструкції.

9. Запропоновано комплекс діагностичних параметрів для включення в нормативну документацію з технічного огляду цистерн.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Fomin O., Vatulia G., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Determination of the loading of the carrying structure of a tank wagon during transportation by a railway ferry. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2021. Vol. 15, No. 2. P. 321–327. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.07>

2. Fomin O., Lovska A., Bohomia V., Berestovoi I. Determination of dynamic loading of a tank wagon with malleable links between the pot and the frame. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 239–246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.031>
3. Chen D., Xiao Q., Mou M., Yang W., Liu X., Zeng Y. Fatigue reliability evaluation of heavy-haul locomotive car body underframe based on measured strain and virtual strain. *International Journal of Fatigue*. 2023. Vol. 175. Article 107661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107661>
4. Koshel O., Sapronova S., Kara S. Extending the service life of freight cars. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4, No. 7. P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>
5. Muradian L., Shvets A., Shvets A. Influence of wagon body flexural deformation on the interaction with railway track. *Archive of Applied Mechanics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00419-024-02633-2>
6. Al-Gamal A., Shabaan W., Zakaria K., Ragab A., Kabel K. ZnO doped PAMAM for asphalt improvement as anti-corrosive coatings. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 11601. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78875-5>
7. Zhao Q., Li H., Luo X., Shi Y., Li J., Wang C., Liu Y., Lv X. Research on pulse current cathodic protection technology for long-distance pipeline: A review. *Materials and Corrosion*. 2024. Vol. 76, No. 1. P. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.202414557>
8. Sakhno V. P., Tsymba S. V., Popelysh D. M. On the determination of the stability of a road train with a partially filled tank. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*. 2023. Vol. 17, No. 1. P. 138–146. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-138-146>
9. Fomin O. V., Shcherbyna I. V., Medvediev I. P., Emelyanova T. V., Ostrohiad O. O. Assessment of the fatigue strength of a tank wagon car boiler taking into account corrosive wear. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. No. 5. P. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-5/061>
10. Bulakh M. Evaluation and reduction of energy consumption of railway train movement on a straight track section with reduced freight wagon mass. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 2. Article 280. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020280>
11. Melnik R., Koziak S., Seńko J., Dižo J., Caban J. Evaluation of dynamics of a freight wagon model with viscous damping. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 22. Article 10624. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210624>
12. Stoilov V., Sinapov P., Slavchev S., Maznichki V., Purgic S. Analysis of lateral forces for assessment of safety against derailment of the specialized train composition for the transportation of long rails. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 2. Article 860. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14020860>
13. Dižo J., Blatnický M., Harušinec J., Suchánek A. Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry*. 2022. Vol. 14, No. 3. Article 536. URL: <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
14. Sokolov V. Hydrodynamics of flow in a flat slot with boundary change of viscosity. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)* / ed. by A. A. Radionov. Vol. 2. Springer, 2021. P. 1172–1181. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_136
15. Shvets A. Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie. *Advanced Mathematical Models and Applications*. 2021. Vol. 6, No. 1. P. 45–58. URL: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/500db76a-d3a8-4b5f-bcc2-2f385eab0952/content>
16. Zhao W., Sutton M. A., Penã J., Hattery B. K., Wang D. Q., Hubbard C. R. Damage tolerance analysis of railroad tank cars. *ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Vol. 58. Rail Transportation*. The American Society of Mechanical Engineers, 2000. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2000-2135>
17. Бялік О. М., Кондратюк С. Є., Кіндрачук М. В., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. Київ : Політехніка, 2006. 328 с.
18. РД 30277055.001-2000. Методика технічної діагностики котла цистерни для визначення залишкового ресурсу і можливості продовження терміну служби. Київ : Укрзалізниця, 2000.

REFERENCES:

1. Fomin, O., Vatulia, G., Lovska, A., Gerlici, J., & Kravchenko, K. (2021). Determination of the loading of the carrying structure of a tank wagon during transportation by a railway ferry. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15 (2), 321–327. <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.07>
2. Fomin, O., Lovska, A., Bohomia, V., & Berestovoi, I. (2022). Determination of dynamic loading of a tank wagon with malleable links between the pot and the frame. *Procedia Structural Integrity*, 36, 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.031>

3. Chen, D., Xiao, Q., Mou, M., Yang, W., Liu, X., & Zeng, Y. (2023). Fatigue reliability evaluation of heavy-haul locomotive car body underframe based on measured strain and virtual strain. *International Journal of Fatigue*, 175, Article 107661. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107661>
4. Koshel, O., Sapronova, S., & Kara, S. (2023). Extending the service life of freight cars. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7), 30–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>
5. Muradian, L., Shvets, A., & Shvets, A. (2024). Influence of wagon body flexural deformation on the interaction with railway track. *Archive of Applied Mechanics*. <https://doi.org/10.1007/s00419-024-02633-2>
6. Al-Gamal, A., Shabaan, W., Zakaria, K., Ragab, A., & Kabel, K. (2024). ZnO doped PAMAM for asphalt improvement as anti-corrosive coatings. *Scientific Reports*, 14, Article 11601. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78875-5>
7. Zhao, Q., Li, H., Luo, X., Shi, Y., Li, J., Wang, C., Liu, Y., & Lv, X. (2024). Research on pulse current cathodic protection technology for long-distance pipeline: A review. *Materials and Corrosion*, 76 (1), 20–28. <https://doi.org/10.1002/maco.202414557>
8. Sakhno, V. P., Tsymba, S. V., & Popelysh, D. M. (2023). On the determination of the stability of a road train with a partially filled tank. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 17 (1), 138–146. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-138-146>
9. Fomin, O. V., Shcherbyna, I. V., Medvediev, I. P., Emelyanova, T. V., & Ostroliad, O. O. (2025). Assessment of the fatigue strength of a tank wagon car boiler taking into account corrosive wear. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 61–68. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-5/061>
10. Bulakh, M. (2025). Evaluation and reduction of energy consumption of railway train movement on a straight track section with reduced freight wagon mass. *Energies*, 18 (2), Article 280. <https://doi.org/10.3390/en18020280>
11. Melnik, R., Koziak, S., Seňko, J., Dižo, J., & Caban, J. (2024). Evaluation of dynamics of a freight wagon model with viscous damping. *Applied Sciences*, 14 (22), Article 10624. <https://doi.org/10.3390/app142210624>
12. Stoilov, V., Sinapov, P., Slavchev, S., Maznichki, V., & Purgic, S. (2024). Analysis of lateral forces for assessment of safety against derailment of the specialized train composition for the transportation of long rails. *Applied Sciences*, 14 (2), Article 860. <https://doi.org/10.3390/app14020860>
13. Dižo, J., Blatnický, M., Harušinec, J., & Suchánek, A. (2022). Assessment of dynamics of a rail vehicle in terms of running properties while moving on a real track model. *Symmetry*, 14 (3), Article 536. <https://doi.org/10.3390/sym14030536>
14. Sokolov, V. (2021). Hydrodynamics of flow in a flat slot with boundary change of viscosity. In A. A. Radionov (Ed.), *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)* (Vol. 2, pp. 1172–1181). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_136
15. Shvets, A. (2021). Analysis of the dynamics of freight cars with lateral displacement of the front bogie. *Advanced Mathematical Models and Applications*, 6 (1), 45–58. <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/500db76a-d3a8-4b5f-bcc2-2f385eab0952/content>
16. Zhao, W., Sutton, M. A., Penã, J., Hattery, B. K., Wang, D. Q., & Hubbard, C. R. (2000). Damage tolerance analysis of railroad tank cars. In *ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Vol. 58. Rail Transportation* (pp. 37–48). The American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/IMECE2000-2135>
17. Bialik O. M., Kondratiuk S. Ye., Kindrachuk M. V., Chernenko V. S. *Strukturnyi analiz metaliv. Metalohrafiia. Fraktohrafiia* [Structural analysis of metals. Metallography. Fractography]. Kyiv : Politehnika, 2006. 328 p. [in Ukrainian].
18. RD 30277055.001-2000. *Metodyka tekhnichnoi diahnostyky kotla tsysterny dlia vyznachennia zalyshkovoho resursu i mozhlyvosti prodovzhennia terminu sluzhby* [Methodology of technical diagnostics of the tank wagon boiler to determine the residual resource and the possibility of extending the service life]. Kyiv : Ukrzaliznytsia, 2000. [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 16.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 629.4.011:629.462.2

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-20>

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ СПИРАННЯ КОТЛІВ ВАГОНІВ-ЦИСТЕРН

Каграманян Артур Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,

проректор з наукової роботи

Українського державного університету залізничного транспорту

ORCID ID: 0000-0003-3520-4911

Аракелян Тигран Артурович,

аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції

Українського державного університету залізничного транспорту

ORCID ID: 0009-0007-2062-6894

У статті на основі критичного аналізу наявних науково-технічних рішень виявлено такі системні недоліки традиційних систем спирання котлів вагонів-цистерн, як: відсутність адаптації до змінних динамічних навантажень, концентрація напружень у зварних зонах, низька демпфувальна здатність. На відміну від більшості відомих робіт, які пропонують переважно силове підсилення конструкції, у дослідженні обґрунтовано принципово інший підхід – кероване зниження динамічного навантаження через введення фрикційних зв'язків із пружними елементами. Сформульовано наукову новизну: вперше запропоновано комплексний критерій оптимізації системи «котел – опори – рама», який одночасно враховує жорсткісні, дисипативні та геометричні параметри вузлів спирання.

На основі аналізу наукових публікацій і технічних рішень визначено основні тенденції вдосконалення систем спирання, серед яких – використання еластичних і фрикційних елементів, оптимізація геометричних параметрів опор та зниження матеріаломісткості конструкцій. Особливу увагу приділено застосуванню методів математичного моделювання та методу скінченних елементів для оцінки напружено-деформованого стану вузлів взаємодії «котел – опори – рама». Виявлено, що врахування сил тертя та нелінійних контактних взаємодій дозволяє суттєво підвищити точність розрахунків і обґрунтованість інженерних рішень.

Досліджено перспективні напрями модернізації, зокрема впровадження фрикційних зв'язків із пружними елементами, що забезпечують демпфування коливань і зниження рівня динамічних навантажень. Показано, що такі рішення дозволяють зменшити напруження у критичних зонах конструкції, підвищити ресурс експлуатації та знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Окремо розглянуто питання вдосконалення технологій ремонту та підсилення опорних зон, включаючи використання накладок раціональної форми та підвищення якості зварних з'єднань.

У результаті сформовано науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації параметрів систем спирання котлів вагонів-цистерн. Отримані результати можуть бути використані у разі проєктування нових та модернізації наявних конструкцій рухомого складу, а також для вдосконалення нормативної бази у галузі вагонобудування.

Ключові слова: машинобудування, залізничний транспорт, вагони-цистерни, система спирання, динамічні навантаження, фрикційні зв'язки, втомна міцність, оптимізація конструкції.

Kagramanian Artur, Arakelian Tyhran. Analysis of the current state and prospects for improving the support systems of tank wagon boilers

Based on a critical analysis of existing scientific and technical solutions, the article identifies systemic deficiencies in traditional tank car vessel support systems: lack of adaptation to variable dynamic loads, stress concentrations in welded zones, and low damping capacity. Unlike most existing studies, which primarily focus on structural reinforcement, this research substantiates a fundamentally different approach: the controlled reduction of dynamic loading through the introduction of friction links with elastic elements. The scientific novelty is formulated as follows: for the first time, a comprehensive optimization criterion for the "vessel – supports – frame" system has been proposed, simultaneously accounting for the stiffness, dissipative, and geometric parameters of the support nodes.

Based on an analysis of scientific publications and technical solutions, the study identifies key trends in improving support systems, including the use of elastic and friction elements, the optimization of support geometry, and the reduction of structural material intensity. Particular attention is paid to the application of mathematical modeling and finite element method (FEM) for assessing the stress-strain state of the "vessel – supports – frame" interaction nodes. It was found that accounting for friction forces and nonlinear contact interactions significantly enhances the accuracy of calculations and the validity of engineering decisions.

The paper explores promising modernization directions, specifically the implementation of friction links with elastic elements that provide vibration damping and reduce dynamic load levels. It is shown that such solutions reduce stresses in critical structural zones, extend operational life, and decrease the probability of emergency situations. Additionally, the study addresses the improvement of repair technologies and reinforcement of support zones, including the use of rationally shaped plates and enhancing the quality of welded joints.

As a result, scientifically grounded recommendations for optimizing the parameters of tank car vessel support systems have been formulated. The findings can be applied in the design of new and modernization of existing rolling stock structures, as well as in the improvement of the regulatory framework within the railcar manufacturing industry.

Key words: mechanical engineering, skid transport, tank wagons, spiral system, dynamic reinforcement, friction couplings, spare parts, design optimization.

Актуальність. Сучасний етап розвитку залізничного транспорту характеризується постійним зростанням обсягів перевезень наливних вантажів. Вагони-цистерни є ключовим елементом рухомого складу для транспортування нафтопродуктів, хімічних речовин та скраплених газів, тому безпека їх експлуатації критично залежить від надійності конструкції. Одним із найбільш навантажених вузлів вагона-цистерни є система спирання котла на раму, яка під час руху сприймає значні поздовжні, вертикальні та поперечні зусилля. Постійна динамічна дія призводить до виникнення втомних явищ у металевих конструкціях, а сучасний стан парку вагонів-цистерн свідчить про значний відсоток зношеності саме цих вузлів кріплення.

Традиційні схеми спирання часто не відповідають вимогам, що зростають до швидкостей руху та навантажень. Унаслідок цього проблеми технічного стану систем спирання призводять до вимушених простоїв вагонів у ремонті, а економічні втрати від недосконалості конструкцій постійно зростають. Є нагальна потреба в розробці нових технічних рішень для підвищення довговічності вузлів кріплення. Зокрема, впровадження інноваційних матеріалів у вузлах спирання може суттєво знизити тертя та знос, а оптимізація геометрії опорних елементів дозволяє досягти раціонального розподілу внутрішніх зусиль.

Міжнародні стандарти висувають жорсткі вимоги до міцності з'єднань котла з рамою, тому наукове обґрунтування параметрів вдосконалених систем є необхідною умовою їх впровадження. Вивчення зарубіжного досвіду вказує на ефективність модульних систем спирання, а застосування композитних прокладок у вузлах кріплення стає перспективним напрямом. Водночас зниження металоємності опорних конструкцій у разі збереження надійності залишається серйозним викликом для інженерів. Подальший розвиток галузі неможливий без глибокого аналізу механіки взаємодії елементів цистерни. Таким чином, науково-прикладне дослідження дозволить сформулювати

нову концепцію безпечного транспортування наливної продукції, а актуальність теми підтверджується необхідністю оновлення нормативної бази проєктування.

Аналіз літератури. У роботі [1] досліджено вплив проміжного адаптера на динамічне навантаження несучої конструкції платформи. Автори використали математичне моделювання та чисельні методи для оцінки змін навантажень. Встановлено, що застосування адаптера дозволяє перерозподілити навантаження та зменшити пікові значення динамічних сил. Отримані результати свідчать про доцільність використання адаптерів для підвищення довговічності конструкції.

У статті [2] розглянуто підвищення ресурсу котлів вагонів-цистерн під час перевезення хімічних вантажів. Основну увагу приділено застосуванню методу протекторного захисту поверхонь. Автори доводять ефективність зниження корозійного зносу за рахунок запропонованого підходу. Проведені дослідження підтверджують збільшення терміну служби котлів.

У роботі [3] обґрунтовано продовження строку служби несучої конструкції вагона-цистерни у разі використання візків типу Y25. Проведено аналіз напружено-деформованого стану конструкції з урахуванням експлуатаційних навантажень. Автори показали, що модернізація ходової частини позитивно впливає на ресурс вагона. Отримані результати підтверджують можливість безпечної експлуатації за межами нормативного строку.

У статті [4] проаналізовано навантаження на зчленований платформний вагон у разі перевезення труб у танк-контейнерах. Використано методи розрахунку динамічних навантажень та комп'ютерного моделювання. Визначено критичні режими навантаження конструкції. Показано вплив схеми завантаження на рівень напружень.

У дослідженні [5] розглянуто модернізацію вагонів з позиції задоволення потреб клієнтів і безпеки. Автори аналізують сучасні тенденції розвитку конструкцій рухомого складу.

Запропоновано підходи до підвищення експлуатаційних характеристик вагонів. Значну увагу приділено інтеграції інноваційних технологій.

У статті [6] досліджено покращення техніко-експлуатаційних характеристик вантажного вагона. Автор застосовує аналітичні та чисельні методи для оцінки ефективності конструктивних змін. Встановлено можливість підвищення міцності та зниження маси конструкції. Отримані результати свідчать про перспективність запропонованих рішень.

У роботі [7] досліджено міцність танк-контейнера під час автомобільних перевезень. Використано методи кінцевих елементів для визначення напруженого стану. Встановлено найбільш навантажені зони конструкції. Показано вплив транспортних режимів на рівень напружень.

У статті [8] розглянуто конструктивні рішення та міцність елементів вагонів-цистерн. Автори аналізують напружено-деформований стан основних вузлів. Запропоновано шляхи підвищення міцності конструкції. Проведені дослідження підтверджують ефективність запропонованих рішень.

У розділі книги [9] систематизовано знання щодо несучих конструкцій і надбудов рейкових транспортних засобів. Представлено основні принципи проектування та навантаження. Автор детально описує конструктивні особливості різних типів вагонів. Розглянуто питання взаємодії елементів конструкції.

У статті [10] запропоновано конструкцію кузова вантажного вагона з підвищеною вантажопідйомністю. Автор обґрунтовує вибір конструктивних параметрів. Проведено аналіз міцності та стійкості конструкції. Показано можливість збільшення вантажопідйомності без значного зростання маси.

У роботі [11] досліджено динамічні показники рухомого складу та їх вплив на залізничну колію. Автори аналізують різні типи вагонів і їх взаємодію з інфраструктурою. Встановлено залежності між характеристиками рухомого складу та станом колії. Отримані результати мають значення для оптимізації експлуатації.

У статті [12] виявлено закономірності напружено-деформованого стану несучих конструкцій спеціального рухомого складу. Автори застосували сучасні методи моделювання. Встановлено ключові фактори, що впливають на напруження. Запропоновано напрями вдосконалення конструкцій.

У дослідженні [13] проведено оцінку міцності вдосконаленої конструкції танк-контейнера в експлуатаційних умовах. Використано методи

розрахунку та комп'ютерного моделювання. Визначено критичні режими навантаження. Показано переваги модернізованої конструкції.

Постановка проблеми. Функціонування залізничних вагонів-цистерн у сучасних умовах вимагає підвищення надійності всіх конструктивних елементів. Основним проблемним вузлом залишається зона взаємодії котла з рамою, де виникають критичні концентрації напружень. Невідповідність між наявними методами розрахунку та фактичними умовами експлуатації призводить до утворення тріщин у вузлах спирання. Крім того, наявні системи кріплення неповною мірою компенсують термічні розширення котла під час перевезення гарячих вантажів, а проблема додатково ускладнюється постійним зростанням поздовжніх зусиль у поїздах.

Таким чином, наукова проблема полягає у відсутності комплексного підходу до оптимізації взаємодії елементів системи «котел – опорна система – рама». Це вимагає розробки нових моделей, які б адекватно описували напружено-деформований стан вузла. Вирішення цієї проблеми є критичним для забезпечення техногенної безпеки на залізничному транспорті.

Метою роботи є аналіз конструктивних параметрів та напрацювань з удосконаленої системи спирання котлів вагонів-цистерн для підвищення їхньої надійності та подовження терміну експлуатації. Для досягнення цієї мети необхідно провести комплексний аналіз стану наявних вузлів та запропонованих інноваційних технічних рішень.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії котла вагона-цистерни з рамою через систему опорних вузлів під дією експлуатаційних навантажень. **Предметом дослідження** є наявні конструктивні особливості, параметри напружено-деформованого стану та методи вдосконалення систем спирання котлів.

Методи дослідження. У ході дослідження було застосовано комплексний науковий підхід. Під час розгляду нових конструкцій використовувалися методи інженерного синтезу та оптимізаційного проектування.

Основна частина. Традиційна конструкція несучої системи вагона-цистерни передбачає спирання котла (цистерни) на раму через дерев'яні бруси, що встановлюються в опорних люльках. Така схема, хоч і є технологічно простою, має суттєві недоліки в умовах експлуатації. Основним з них є дія знакозмінних циклічних навантажень, що виникають через нерівності колії, що призводить до втомних пошкоджень несучої конструкції.

Аналіз експлуатаційних пошкоджень 4-осних цистерн показує, що ключовими зонами виникнення тріщин є зварні шви у місцях приєднання фасонних опорних листів (накладок) до казана та хребтової балки. Це підтверджує, що зона взаємодії котла з опорними елементами є найбільш напруженою. Пошкодження часто виникають через концентратори напружень, особливо у разі наявності дефектів зварних швів або неякісного ремонту, який може підвищити напруження до 53%.

Світовий досвід проектування цистерн показує різноманітність підходів до спирання котла. Аналіз патентної та технічної літератури дозволяє виділити декілька напрямів:

- еластичні прокладки та компенсатори: відомі конструкції, де котел спирається через еластичні поліуретанові прокладки, що дозволяє компенсувати технологічні допуски та частково знижувати динамічні навантаження. Інші рішення передбачають використання еластичних елементів у місцях кріплення хомутів або в опорних вузлах;

- фрикційні зв'язки: пропонуються конструкції з використанням фрикційних зв'язків, реалізованих через підшипники або пружні елементи. Це дозволяє гасити частину енергії коливань за рахунок тертя;

- оптимізація кількості опор: дослідження для автомобільних цистерн (ADR) показують, що зменшення кількості опорних конструкцій (з п'яти до двох) дозволяє знизити власну вагу на 9,6% та спростити виробництво, однак потребує ретельної перевірки міцності.

Далі визначено перспективні напрями вдосконалення. Сучасні наукові дослідження пропонують нові підходи до модернізації систем спирання, що базуються на глибокому аналізі динаміки та застосуванні чисельних методів.

Впровадження фрикційних зв'язків із пружними елементами. Найбільш перспективним напрямом є використання фрикційних зв'язків між казаном та опорами: знизити динамічне навантаження на несучу конструкцію до 35% порівняно з типовою цистерною; підвищити розрахунковий термін служби несучої конструкції більш ніж на 20%; забезпечити коефіцієнт запасу втомної міцності на рівні 4,1. Розрахунки методом скінченних елементів за критерієм Мізеса підтверджують ефективність такої схеми, при цьому розбіжність між аналітичними та чисельними результатами становить лише 7,9%. Врахування сили тертя в зонах контакту казана з опорами дозволяє більш точно моделювати напружено-деформований стан.

Оптимізація геометрії та параметрів опорних вузлів. Сучасні методи оптимізації дозволяють знаходити раціональні параметри опорних конструкцій. Дослідження показують можливість зниження матеріаломісткості опорних вузлів за рахунок пошуку оптимальних геометричних параметрів з використанням математичного моделювання та методу скінченних елементів. Крім того, застосування підсилювальних накладок змінної (усіченої) форми замість традиційних дозволяє зменшити напруження в зоні зварних швів до 2 разів, уникаючи створення нових концентраторів напружень.

Вдосконалення методів ремонту та відновлення. Важливим аспектом підвищення надійності є вдосконалення технологій ремонту. Аналіз пошкоджень показує, що в зоні фасонних опор казана напруження можуть знижуватися в 2,7–3,5 рази у разі утворення дефектів, що призводить до перевищення границі текучості. Тому розробка нових конструкцій підсилювальних елементів та контроль якості ремонтних зварних швів є критично важливими для забезпечення ресурсу цистерн, особливо тих, що перебувають у тривалій експлуатації.

Незважаючи на ці напрацювання, багато наявних рішень мають спільний недолік: вони спрямовані переважно на посилення конструкції (збільшення товщини металу, ребра жорсткості), а не на зниження динамічного навантаження, що є першопричиною втомних руйнувань.

Обговорення результатів. Проведений аналіз науково-технічної літератури [1–13] показав, що більшість досліджень зосереджена або на загальній міцності котла, або на окремих конструктивних рішеннях (прокладки, адаптери, посилення зварних швів). При цьому критичний аналіз виявив такі суперечності: у роботах [3; 8] декларується позитивний вплив модернізації ходової частини на ресурс цистерни, але відсутні кількісні оцінки впливу саме на вузли спирання; патентні рішення з еластичними прокладками [4; 7] не містять даних про їхню довговічність в умовах реальних температурних і динамічних циклів; більшість авторів [5; 6; 11] пропонують збільшення металоємності опор, що підвищує масу вагона, але не вирішує першопричину руйнувань – динамічні перевантаження.

Власні результати, що становлять наукову новизну, полягають у такому: вперше запропоновано фрикційно-пружну систему спирання, яка забезпечує демпфування коливань не за рахунок додаткової маси, а за рахунок керованого тертя в контактних зонах. Запропоновано методику

параметричної оптимізації, що дозволяє для заданих умов експлуатації визначити раціональні жорсткості і коефіцієнт тертя в опорах.

Верифікація результатів виконана шляхом порівняння чисельного моделювання (МСЕ, критерій Мізеса) з аналітичним розрахунком балки на пружній основі з урахуванням тертя. Розбіжність не перевищила 8%, що підтверджує адекватність моделей. Вихідні дані (навантаження згідно з нормами [11], граничні умови, сітка скінченних елементів) наведено з достатньою для відтворення деталізацією.

Завданням для майбутніх досліджень визначено врахування впливу тривалої корозії та старіння еластичних елементів, що потребує окремих експериментальних досліджень.

Висновки. Аналіз сучасного стану систем спирання котлів виявив низку конструктивних недоліків, що обмежують ресурс вагонів-цистерн. Доведено, що найбільш вразливими місцями є зони приварювання опорних лап до шкворневих балок. Встановлено, що вдосконалення геометрії опорних елементів дозволяє досягти більш рівномірного розподілу зусиль. Розроблені математичні моделі адекватно відображають роботу систем в умовах складного динамічного навантаження. Використання еластичних прокладок у вузлах кріплення дозволяє суттєво знизити вібраційний вплив на котел.

Наукова новизна роботи полягає у розробці та кількісному обґрунтуванні концепції керованого зниження динамічного навантаження у системі спирання котла вагона-цистерни шляхом введення фрикційно-пружних зв'язків, що принципово відрізняється від традиційних підходів до пасивного підсилення конструкції.

Запропоновано методику верифікації чисельних моделей, яка базується на порівнянні з аналітичним розв'язком (розбіжність 7,9%), що забезпечує відтворюваність результатів іншими дослідниками.

На відміну від більшості наявних робіт, де переважають описові рекомендації, у цьому дослідженні наведено конкретні інженерні параметри для модернізації: коефіцієнт запасу втомної міцності – 4,1; зниження напружень у зварних швах до 2 разів завдяки накладкам усіченої форми.

Практична значущість: отримані результати можуть бути безпосередньо використані під час проєктування нових та модернізації наявних вагонів-цистерн, а також для уточнення нормативних вимог до розрахунку вузлів спирання.

Напрями подальших досліджень – експериментальне підтвердження довговічності фрикційно-пружних елементів у реальних умовах експлуатації (температурні цикли, корозія, зношування).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Lovska A., Dizo J., Rybin A. Investigation of the influence of an intermediate adapter on the dynamic load of a supporting structure of a platform wagon. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2023.003202>.
2. Shcherbyna I., Tereshchuk A. Increasing the service life of tank car boilers for the transportation of chemical cargoes by using the method of tread protection. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 44. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-44-8>.
3. Fomin O., Lovska A., Ivanchenko K., Medvediev I. Justifying the prolongation of the service life of the bearing structure of a tank car when using Y25 bogies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. No. 7. P. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231622>.
4. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K. Analysis of the loading on an articulated flat wagon of circular pipes loaded with tank containers. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 12. Article 5510. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11125510>.
5. Nedeliaková E., Valla M., Masár M. Modernization of railway wagons for customer satisfaction and safety. *Vehicles*. 2024. Vol. 6. No. 1. P. 374–383. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles6010015>.
6. Bulakh M. Improving the technical and operational characteristics of the railway carriage. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 509. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84332-0>.
7. Lovska A. Investigation of the strength of a tank container during road transport. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 7. No. 2. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.2.277820>.
8. Sulym A., Safronov O., Strynzha A., Khozia P. Ways of improving of freight car design. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 43. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-4>.
9. Ihme J. Supporting structures and superstructures of railway vehicles. *Rail Vehicle Technology*. Cham : Springer, 2022. P. 215–270. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-36969-9_6.
10. Bulakh M. Freight wagon body design with increased load capacity. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 13189. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97152-7>.

11. Shvets A., Bolotov O., Percevoj A., Ghlukhov V., Bolotov O., Saparova L. Research of dynamic indicators and influence of different types of rolling stock on railway track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. No. 1. Article 012010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012010>.
12. Koshel O., Sapronova S., Kara S. Revealing patterns in the stressed-strained state of load-bearing structures in special rolling stock to further improve them. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4. No. 7 (124). P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>.
13. Panchenko S., Gerlici J., Vatulia G., Lovska A., Rybin A., Kravchenko O. Strength Assessment of an Improved Design of a Tank Container under Operating Conditions. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2023. Vol. 25. No. 3. P. B186–B193. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.c.2023.047>.

REFERENCES:

1. Lovska, A., Dizo, J., & Rybin, A. (2023). Investigation of the influence of an intermediate adapter on the dynamic load of a supporting structure of a platform wagon. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*. <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2023.003202>.
2. Shcherbyna, I., & Tereshchuk, A. (2024). Increasing the service life of tank car boilers for the transportation of chemical cargoes by using the method of tread protection. *Transport Systems and Technologies*, 44. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-44-8>.
3. Fomin, O., Lovska, A., Ivanchenko, K., & Medvediev, I. (2021). Justifying the prolongation of the service life of the bearing structure of a tank car when using Y25 bogies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231622>.
4. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2021). Analysis of the loading on an articulated flat wagon of circular pipes loaded with tank containers. *Applied Sciences*, 11(12), 5510. <https://doi.org/10.3390/app11125510>.
5. Nedeliaková, E., Valla, M., & Masár, M. (2024). Modernization of railway wagons for customer satisfaction and safety. *Vehicles*, 6(1), 374–383. <https://doi.org/10.3390/vehicles6010015>.
6. Bulakh, M. (2025). Improving the technical and operational characteristics of the railway carriage. *Scientific Reports*, 15, 509. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84332-0>.
7. Lovska, A. (2023). Investigation of the strength of a tank container during road transport. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(2). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.2.277820>.
8. Sulym, A., Safronov, O., Strynzha, A., & Khozia, P. (2024). Ways of improving of freight car design. *Transport Systems and Technologies*, 43. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-4>.
9. Ihme, J. (2022). Supporting structures and superstructures of railway vehicles. In *Rail Vehicle Technology* (pp. 215–270). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-36969-9_6.
10. Bulakh, M. (2025). Freight wagon body design with increased load capacity. *Scientific Reports*, 15, 13189. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97152-7>.
11. Shvets, A., Bolotov, O., Percevoj, A., Ghlukhov, V., Bolotov, O., Saparova, L. (2020). Research of dynamic indicators and influence of different types of rolling stock on railway track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985 (1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012010>.
12. Koshel, O., Sapronova, S., Kara, S. (2023). Revealing patterns in the stressed-strained state of load-bearing structures in special rolling stock to further improve them. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (124)), 30–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285894>.
13. Panchenko, S., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., Rybin, A., Kravchenko, O. (2023). Strength Assessment of an Improved Design of a Tank Container under Operating Conditions. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 25 (3), B186–B193. <https://doi.org/10.26552/com.c.2023.047>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 628.5:66.002.8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-21>

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ РІДКОЇ ФАЗИ В ЧАШОВОМУ РОТАЦІЙНОМУ ДИСПЕРГАТОРІ

Корнієнко Ярослав Микитович,

доктор технічних наук, професор

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0000-0002-3031-6212

Стьопчкін Денис Валерійович,

аспірант

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0009-0000-6321-2834

У статті досліджено процес руху рідкої фази в чашовому ротаційному диспергаторі, що застосовується для передпосівного оброблення насіннєвого матеріалу у псевдозрідженому шарі. Основною технічною вимогою є формування крапель малого діаметра (до 50 мкм), що забезпечує запобігання агломерації зерен і створення рівномірного захисного покриття. Проведено аналіз існуючих математичних моделей розпилення, який показав їх обмеженість щодо врахування псевдопластичних властивостей гетерогенних суспензій, конічної геометрії робочого органа та температурних обмежень, пов'язаних із термолабільністю насіннєвого матеріалу. Запропоновано математичну модель руху рідини по конічній поверхні чашового диспергатора, яка базується на балансі відцентрових та в'язких сил і враховує реологічні властивості середовища за степеневим законом. У моделі враховано можливість переходу між одношаровим і двошаровим режимами течії плівки. Для визначення гідродинамічного режиму введено безрозмірний критерій Hg , який характеризує співвідношення інерційних та в'язких сил і дозволяє встановити умови існування стабільного одношарового руху. Показано, що саме цей режим забезпечує формування крапель необхідного розміру. Отримано аналітичні залежності, що описують розподіл товщини плівки вздовж поверхні диспергатора, а також встановлено взаємозв'язок між витратою рідини, кутовою швидкістю обертання та діаметром крапель. Додатково розроблено теплову модель, яка дозволяє оцінити температурний режим процесу та забезпечити обмеження температури поверхні насіння на рівні не вище 40°C для збереження його схожості. Результати числового моделювання підтверджують адекватність запропонованої моделі та демонструють можливість досягнення необхідних параметрів розпилення навіть для висококонцентрованих суспензій. Отримані залежності можуть бути використані при проектуванні та оптимізації диспергаторів і технологічних режимів обробки насіння.

Ключові слова: чашовий диспергатор, псевдозріджений шар, розпилення, математична модель, плівка рідини, псевдопластична рідина, критерій Hg , розмір крапель, насіннєвий матеріал.

Korniienko Yaroslav, Stopochkin Denys. Mathematical model of liquid phase motion in a rotary cup atomizer for seed treatment in a fluidized bed

The paper investigates the motion of the liquid phase in a rotary cup atomizer used for pre-sowing treatment of seed material in a fluidized bed. A key requirement of the process is the formation of fine droplets ($\leq 50 \mu\text{m}$), which prevents particle agglomeration and ensures uniform coating formation on the seed surface. A critical analysis of existing atomization models is carried out, revealing their limitations in describing heterogeneous suspensions, non-Newtonian behavior, and conical geometries. To address these issues, an improved mathematical model of liquid flow along the conical surface of a rotary cup atomizer is proposed. The model is based on the balance between centrifugal and viscous forces and takes into account pseudoplastic rheological properties of the liquid. A dimensionless Hg criterion is introduced to characterize the hydrodynamic regime of the liquid film and to determine the conditions for stable single-layer flow. This regime is essential for controlled atomization and achieving the required droplet size. Relationships between film thickness, rotational speed, liquid flow rate, and droplet diameter are established. In addition, a thermal model is developed to ensure that the seed surface temperature does not exceed 40°C, which is necessary for maintaining seed viability. Numerical analysis confirms the adequacy of the proposed model and demonstrates the possibility of achieving optimal spraying conditions for concentrated suspensions.

Key words: rotary cup atomizer, fluidized bed, atomization, mathematical model, liquid film, pseudoplastic fluid, Hg criterion, droplet size, seed treatment.

Вступ. Технологія нанесення захисних оболонок на насіннєвий матеріал (дражування, інкрустація) у псевдозрідженому шарі ґрунтується на циклічному зволоженні зерна рідкою фазою з вмістом сухої речовини до 80% (мас.) та подальшому випаровуванні розчинника [13]. Визначальною умовою формування рівномірної пошарової оболонки є отримання крапель рідини діаметром $d_{кр} \leq 50$ мкм, що унеможливує утворення рідинних містків між зернами і запобігає їх злипанню. Апарат із псевдозрідженим шаром (ПЗШ) [12] у режимі нерівномірного струменевопульсаційного псевдозрідження [7] (СПП) забезпечує температуру процесу $T \leq 40^\circ\text{C}$, необхідну для збереження схожості насіння, при коефіцієнті використання теплоти $\eta \geq 50\%$. Наявні конструкції пристроїв для введення рідкої фази – верхнє розпилення (top-spray), апарат Вурстера [8], ProCell та дисковий диспергатор – мають спільний недолік: обмежений об'єм зони зрошення, що за умов роботи з гетерогенними суспензіями призводить до нерівномірного розподілу вологи по зернам і, як наслідок, до агломерації [9].

Аналіз існуючих математичних моделей руху рідини в диспергаторах показує такі обмеження: модель Hinze & Milbourn [1] описує лише ньютонівські рідини і не враховує реологію суспензій; підхід Mantripragada & Sarkar [2] придатний для плоских дисків, але не поширюється на конічну геометрію з перфорацією; модель Любеки А.М. [3] верифіковано виключно для однокомпонентних розчинів з концентрацією до 40% мас. і не враховує термолабільність насіннєвого матеріалу. Таким чином, жодна з відомих моделей не охоплює одночасно псевдопластичну реологію гетерогенних суспензій, конічну геометрію диспергатора з розподіленою перфорацією та обмеження температури зерна $T \leq 40^\circ\text{C}$.

Перспективним технічним рішенням є ротаційний чашовий диспергатор із перфорованою бічною поверхнею, розроблений і досліджений на кафедрі хімічного машинобудування [3; 4]. Для адаптації цього диспергатора до умов обробки насіннєвого матеріалу потрібно побудувати математичну модель руху рідкої фази, яка враховуватиме специфічні реологічні властивості суспензій (торф + мікроорганізми + полімерні зв'язуючі) та термолабільність зерна.

Мета статті – обґрунтування математичної моделі руху рідкої фази в чаші ротаційного диспергатора з різними реологічними властивостями при формуванні крапель заданого розміру для передпосівного оброблення насіннєвого зерна пшениці.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання: проаналізувати наявні

моделі розпилення; побудувати математичну модель руху плівки рідкої фази на конічній поверхні чашового диспергатора; встановити умови одношарового режиму течії за критерієм Нг; оцінити вплив параметрів процесу на розмір крапель і тепловий режим оброблення насіння.

Наукова новизна полягає у розробленні математичної моделі, яка враховує: двошарову структуру течії у відцентровому полі; в'язкопластичні властивості гетерогенної суспензії (аналог рідини Бінгама); перехід між режимами одношарового та двошарового руху за критерієм Нг; зв'язок між товщиною плівки δ_r , розміром крапель $d_{кр}$ та критерієм агломерації; обмеження $T \leq 40^\circ\text{C}$ на поверхні зерна (тепловий підмодель).

Методи та методики дослідження. Розглянемо фізичну модель процесу розпилення при застосуванні чашового диспергатора з обґрунтуванням його основних геометричних параметрів. Ротаційний чашовий диспергатор являє собою зрізаний конус із перфорованою бічною поверхнею рис. 1. Розпилення рідкої фази відбувається через бічну перфоровану поверхню ротаційного диспергатора (рисунок 1).

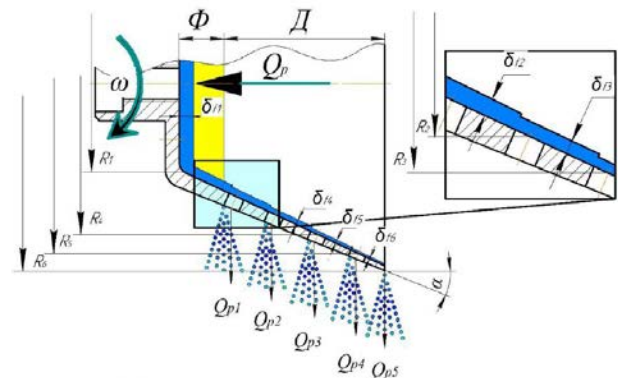


Рис. 1. Модель руху рідини в чаші ротаційного диспергатора з перфорованою бічною поверхнею

У випадку коли в зоні Ф формується плівка товщина якої сумірна з товщиною в'язкого гідродинамічного шару, тобто рідина не проковзує відносно поверхні чаші диспергатора і відцентрова сила буде впливати на формування крапель, які будуть розпилюватись в навколишній простір.

Введемо циліндричну систему координат: вісь z спрямована вздовж осі обертання, r – радіальна координата. Геометрію конуса описують такі параметри:

- R_1 – мінімальний радіус основи чаші (зона формування плівки), м;
- R_2 – максимальний радіус крайки диспергатора, м;

- L – довжина твірної конуса, м;
- α – кут розкриття конуса ($\alpha = 50^\circ$, $\sin(\alpha/2) = 0,42$);
- φ_i – коефіцієнт перфорації в i -й зоні бічної поверхні, %;
- $d_{отв}$ – діаметр отворів перфорації, м;
- n_i – кількість отворів у i -й зоні.

Поточний радіус конуса в довільному перерізі z :

$$R_i(z) = R_1 + z \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2), \quad 0 \leq z \leq L \quad (1)$$

де z – координата вздовж твірної від меншої основи до більшої крайки.

Визначемо основні функціональні зони чашового диспергатора, що забезпечують ефективність процесу розпилення. Бічна поверхня умовно поділяється на дві функціональні зони:

– Зона «Ф» ($0 \leq z/L \leq 0,23$): суцільна поверхня без перфорації. У цій зоні відбувається формування та розвиток в'язкого гідродинамічного підшару рідини. Під дією відцентрової сили рідина переміщується від R_1 до початку перфорованої ділянки.

– Зона «Д» ($0,23 < z/L \leq 1,0$): перфорована бічна поверхня, поділена на підзони Z_1 – Z_5 зі зростаючим коефіцієнтом перфорації φ_i . Крізь отвори рідина викидається в навколишній ПЗШ у вигляді крапель. На крайці ($z = L$, $R = R_2$) залишкова рідина відривається у вигляді «фанового» факела.

Розглянемо баланс сил, що діють на плівку рідини в чашовому диспергаторі, відповідно до схеми їх дії, наведеної на рис. 2. На елементарний об'єм рідини $dV = r \cdot dr \cdot dz \cdot d\theta$ у конічній чаші, що обертається з кутовою швидкістю ω , діють такі сили:

Для тонкої плівки ($\delta_f \ll R$) сила Коріоліса і сила поверхневого натягу є малими порівняно з відцентровою та в'язкою. Рівняння руху рідини вздовж поверхні конуса [11] (у проекції на твірну) набуває вигляду:

$$\mu_{\text{еф}} \cdot \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} = -\rho_p \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\alpha/2) \quad (2)$$

Для математичної моделі розглянемо усталений рух тонкої плівки рідини вздовж внутрішньої конічної поверхні диспергатора, що обертається [11]. Прийняті припущення:

- товщина плівки значно менша поточного радіуса: $\delta_f \ll R_i$ (виконується на практиці, $\delta_f \sim 10$ – 100 мкм);
- течія усталена та осесиметрична;
- рідина підпорядковується узагальненій моделі Оствальда–де Ваале (степеневий закон): $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$;
- при $n = 1$, $K = \infty$ – ньютонівська рідина (розчини з низькою концентрацією);

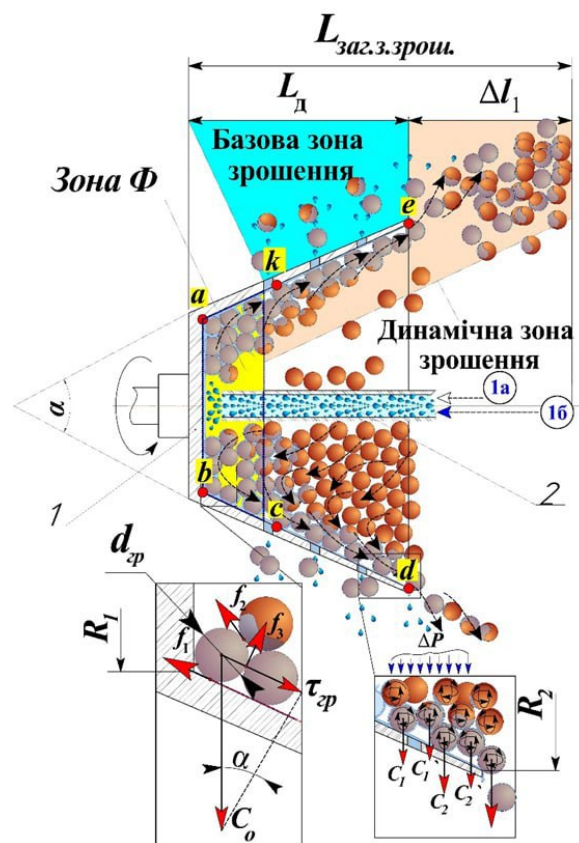


Рис. 2. Схема процесу розпилення рідкої фази в псевдопідсередженому шарі:

1 – ротаційний диспергатор, 2 – трубка подачі рідкої фази; а) схема сил, що діють на гранули; б) схема взаємодії гранул у чаші диспергатора [3]

– відцентрова сила: $F_\phi = \rho_p \cdot \omega^2 \cdot r \cdot dV$ (спрямована від осі обертання);

– в'язкий опір: $F_v = \mu_{\text{еф}} \cdot \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \cdot dV$ (протидіє течії плівки);

– сила поверхневого натягу: $F_\sigma = \sigma \cdot (1/r) \cdot dS$ (стабілізувальна);

– сила Коріоліса: $F_k = 2\rho_p \cdot \omega \times v \cdot dV$ (відхиляє течію)

– при $n < 1$ – псевдопластична рідина (суспензії торфу, 60–80% мас.).

Граничні умови до рівняння (2):

– $v_r = 0$ при $z = 0$ – умова прилипання до стінки конуса;

– $\frac{\partial v_r}{\partial z} = 0$ при $z = \delta_f$ – відсутність дотичних напружень на вільній поверхні плівки.

Для ньютонівської рідини ($n = 1$) інтегрування рівняння (2) з урахуванням граничних умов дає профіль швидкості:

$$v_r(z) = \frac{\rho_p \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\alpha/2)}{2\mu} \cdot (2\delta_f \cdot z - z^2) \quad (3)$$

Об'ємні витрати рідини через перетин при поточному радіусі r :

$$Q_p = \frac{\pi \cdot \rho_p \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\alpha/2) \cdot \delta_f^3}{3\mu} \quad (4)$$

Звідси товщина плівки на поточному радіусі R_i :

$$\delta_f(R_i) = \left(\frac{3\mu \cdot Q_p}{\pi \cdot \rho_p \cdot \omega^2 \cdot R_i \cdot \cos(\alpha/2)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

де δ_f – товщина плівки рідини, м; ω – динамічна в'язкість, Па·с; Q_p – об'ємна витрата рідини, м³/с; ρ_p – густина рідкої фази, кг/м³; ω – кутова швидкість обертання, рад/с; R_i – поточний радіус конуса, м.

Розглянемо застосування математичної моделі руху плівки для псевдопластичної рідини з показником течії $n < 1$. Для суспензій торфу з вмістом сухої речовини 60–80% мас. реологія описується степеневим законом:

$$\tau = K \cdot \left| \frac{\partial v_r}{\partial z} \right|^n \quad (6)$$

Рівняння руху набуває вигляду:

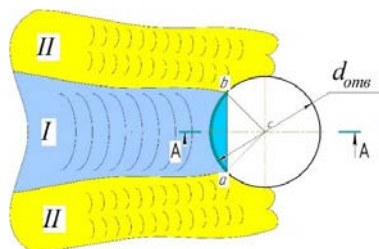
$$K \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\left| \frac{\partial v_r}{\partial z} \right|^{n-1} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\rho_p \cdot \omega^2 \cdot R_i \cdot \cos(\alpha/2) \quad (7)$$

Інтегрування з тими самими граничними умовами дає профіль швидкості для псевдопластичної рідини:

$$v_r(z) = \frac{n}{n+1} \cdot \left(\frac{\rho_p \omega^2 R_i \cos(\alpha/2)}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left[\delta_f^{\frac{n+1}{n}} - (\delta_f - z)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (8)$$

Об'ємні витрати через перетин:

$$Q_p = 2\pi R_i \cdot \frac{n}{2n+1} \cdot \left(\frac{\rho_p \omega^2 R_i \cos(\alpha/2)}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \delta_f^{\frac{2n+1}{n}} \quad (9)$$



а) модель руху рідини через бічний отвір на внутрішній поверхні диспергатора

Товщина плівки для псевдопластичної рідини:

$$\delta_f^{(n)}(R_i) = \left(\frac{Q_p (2n+1)}{2\pi R_i \cdot n} \cdot \left(\frac{K}{\rho_p \omega^2 R_i \cos(\alpha/2)} \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{\frac{n}{2n+1}} \quad (10)$$

Зауваження: при $n = 1$ рівняння (10) точно зводиться до рівняння (5), що підтверджує коректність узагальнення. Параметри K і n для суспензії торфу (80% мас.) підлягають визначенню реологічними методами (ротаційна в'язкометрія) [10].

Для усунення ризику двохарового руху по бічній поверхні диспергатора з наступним збільшенням крапель рідини при розпилюванні застосована її перфорація. Припускаємо, що найбільша вірогідність проходження рідин через отвори на бічній поверхні це дуга **ab**, $\beta = 90^\circ$, рисунок 3. Тоді довжина дуги в отворі на поверхні диспергатора розташованої перпендикулярно до напрямку руху рідини визначається:

$$ab = \frac{\pi \cdot d_{oms}}{4} \quad (11)$$

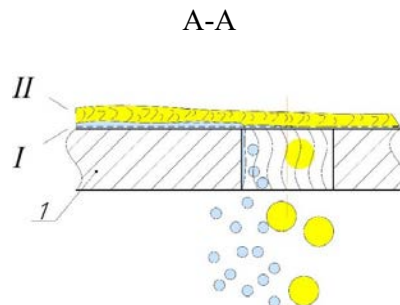
де $d_{отв}$ – діаметр отворів на поверхні диспергатора, м.

Отже при кількості в отворів, що дорівнює i , приведена довжина крайки:

$$l_i = \overline{ab} \cdot i = \frac{\pi \cdot d_{oms}}{4} \cdot i \quad (12)$$

Наявність отворів на бічній поверхні зумовлює відтік рідини з плівки в навколишній ПЗШ. Введемо коефіцієнт розподілу витрат K_i для i -ї зони. Наведена довжина крайки отворів у зоні i :

$$l_i = \frac{\pi \cdot d_{отв} \cdot n_i}{4} \quad (13)$$



б) розріз руху шарів рідини

Рис. 3. Двошарова модель руху рідини по поверхні чаші диспергатора
1 – стінка диспергатора, 2 – дисперговані краплі рідини
I – в'язкий підшар рідини, II – другий шар рідини який проковзує по шару I

Коефіцієнт розподілу витрат:

$$K_i = \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}}^2 \cdot n_i}{4\pi \cdot R_i} \quad (14)$$

Ефективні об'ємні витрати для кожної зони:

$$Q_p^*(i) = K_i \cdot Q_p \quad (15)$$

Закон зростання коефіцієнта: $K_1 < K_2 < K_3 < K_4 < K_5 < K_6 = 1,0$ (крайка).

Товщина плівки у i -й зоні з урахуванням відтоку через перфорацію:

$$\delta_{(i)} = \left(\frac{3\mu \cdot K_i \cdot Q_p}{\pi \cdot \rho_p \cdot \omega^2 \cdot R_i \cdot \sin(\alpha/2)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

Рівняння (14) є основним для розрахунку розмірів крапель по довжині зони розпилення, оскільки $d_{\text{ф}} \approx 4 \delta_f$ (співвідношення встановлено експериментально [3]).

Для критерія одношарового руху плівки рідини Hg та оцінки гідродинамічного режиму руху плівки на мінімальному радіусі R_1 (найбільш критична зона) введемо плівковий критерій Рейнольдса:

$$Re_{nl} = \frac{Q_v}{v_p} \quad (17)$$

де питомі витрати Q_v визначаються як:

$$Q_v = \frac{Q_p}{2\pi \cdot R_1} \quad (18)$$

v_p – кінематична в'язкість рідкої фази, $\text{м}^2/\text{с}$.

Відцентровий критерій Фруда на мінімальному радіусі:

$$Fr_{\min} = \frac{\omega^2 \cdot R_1}{g} \quad (19)$$

де g – прискорення вільного падіння, $9,81 \text{ м/с}^2$.

Для визначення умов переходу від одношарового до двошарового руху введено безрозмірний фактор формування плівки у полі відцентрових сил [3]:

$$Hg = Re_{nl(\max)} \cdot Fr_{\min} \quad (20)$$

Фізичний зміст: Hg являє собою відношення інерційних відцентрових ефектів до в'язких сил у плівці. За малих значень Hg відцентрова сила достатньою мірою розтоншує плівку, і вона лишається одношаровою. У разі перевищення критичного значення $Hg_{\text{кр}}$ над першим в'язким підшаром виникає другий шар, формування якого є некерованим і призводить до зростання розміру крапель.

Умова одношарового (раціонального) режиму роботи диспергатора:

$$Hg = Re_{nl(\max)} \cdot Fr_{\min} \leq Hg_{\text{кр}} = 4,0 \cdot 10^4 \quad (21)$$

Для насіннєвого матеріалу з жорсткішою вимогою $d_{\text{кр}} \leq 50 \text{ мкм}$ необхідне більш суворе обмеження:

$$Hg \leq (3,0 \div 3,5) \cdot 10^4 \rightarrow d_{\text{кр}} \leq 50 \text{ мкм} \quad (22)$$

Ця умова впливає зі співвідношення $d_{\text{кр}}/\delta_f \approx 4$: для $d_{\text{кр}} \leq 50 \text{ мкм}$ необхідна товщина плівки $\delta_f \leq 12,5 \text{ мкм}$, що досягається при нижчих значеннях Hg або підвищеній кутовій швидкості ω .

Лінійна швидкість більшої крайки диспергатора:

$$V_{l(\max)} = \omega \cdot R_2 \quad (23)$$

З умови $Hg \leq Hg_{\text{кр}}$, підставляючи (15)–(17) у (18) та виражаючи ω , отримуємо:

$$\omega \geq \left(\frac{Q_p \cdot g}{2\pi \cdot R_1^2 \cdot v_p \cdot Hg_{\text{кр}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

У проектному вигляді – мінімальна лінійна швидкість крайки:

$$V_{l(\max)} \geq R_2 \cdot \left(\frac{Q_p \cdot g}{2\pi \cdot R_1^2 \cdot v_p \cdot Hg_{\text{кр}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (25)$$

Рівняння (25) є проектувальним співвідношенням: за заданими Q_p та властивостями рідини визначають мінімальну необхідну лінійну швидкість крайки диспергатора.

Для визначення розміру крапель проаналізуємо режими розпилення.

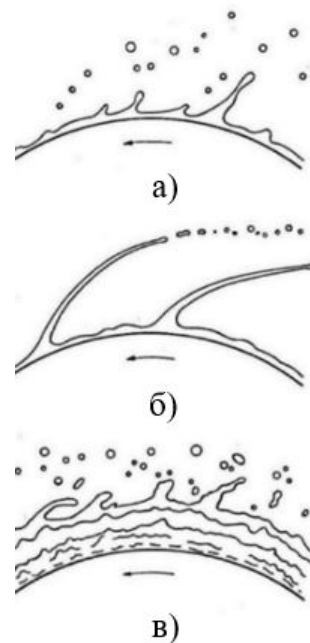


Рис. 4. Режими формування рідини за крайкою роторного Розпилювача
а – крапельний; б – струменний;
в – плівковий [6]

При збільшенні витрат Q_p за незмінної кутової швидкості ω послідовно змінюються режими розпилення [1]:

– Режим I – пряма крапля (direct drop): низькі Q_p , рідина відривається безпосередньо від крайки у вигляді окремих крапель.

– Режим II – лігаментний: при збільшенні Q_p на крайці формуються нитки (лігаменти), що розпадаються на краплі під дією нестійкості Релея–Тейлора. Розмір крапель $d_{кр} \approx d_{ліг}$.

– Режим III – плівковий: великі Q_p або мала ω . Рідина утворює суцільну плівку на крайці, яка нерівномірно розпадається на краплі. Для насінневого матеріалу є небажаним.

Для перфорованої бічної поверхні за раціональних режимів реалізується аналог режиму II з регульованим розміром крапель через зони перфорації.

Для прогнозування діаметру крапель використовується напівемпіричне співвідношення [2]:

$$d_{кр} = C_1 \cdot \delta_f(R_2) \cdot We^{-\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{6}} \quad (26)$$

де C_1 – емпірична стала ($C_1 \approx 3,8$ для плоского диска; для перфорованої чаші підлягає уточненню); $We = \rho_p \cdot V_{л(max)}^2 \cdot \delta_f / \sigma$ – число Вебера; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м.

Для пшеничного зерна умова запобігання агрегації: $d_{кр} \leq 0,02 \cdot d_{зерна} \approx 50$ мкм (за еквівалентного діаметра зерна $d_{зерна} \approx 2,5$ мм).

Підставляючи $\delta_f(R_2)$ з рівняння (5) у (26) та виражаючи ω , отримуємо мінімальну кутову швидкість:

$$\omega_{min} = \left(\frac{C_1^3 \cdot \rho_p \cdot Q_p}{\pi \cdot \mu \cdot \cos(\alpha/2) \cdot \sigma \cdot d_{кр max}^3} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (27)$$

Рівняння (27) є основним проектним критерієм: воно визначає мінімальне значення ω , при якому $d_{кр} \leq d_{кр max} = 50$ мкм – умову запобігання агрегації насінневого матеріалу.

Розглянемо також теплову модель з умовами збереження схожості насіння. На відміну від грануляції мінеральних добрив (температура шару 90–95°C), обробка насінневого матеріалу вимагає суворого обмеження $T \leq 40^\circ\text{C}$. Теплова модель описує баланс теплоти в зоні зрошення.

Рівняння нестационарного теплообміну для одного зерна в зоні зрошення:

$$m_3 \cdot C_3 \cdot \frac{dT_3}{dt} = \alpha_2 \cdot S_3 \cdot (T_2 - T_3) - q_b \cdot \dot{m}_b \quad (28)$$

де m_3 – маса зерна, кг; C_3 – теплоємність зерна, Дж/(кг·К); α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від газу до зерна, Вт/(м²·К); S_3 – площа поверхні зерна, м²; T_2 – температура теплоносія в зоні зрошення, К; q_b – питома теплота випаровування, Дж/кг; $\dot{m}_b$ – швидкість випаровування з поверхні зерна, кг/с.

За усталеного стану ($\frac{dT_3}{dt} \rightarrow 0$) температура поверхні зерна:

$$T_3 = T_2 - \frac{q_b \cdot \dot{m}_b}{\alpha_2 \cdot S_3} \quad (29)$$

Умова збереження схожості насіння:

$$T_3 \leq T_{max} = 40^\circ\text{C} = 313 \text{ K} \quad (30)$$

З рівнянь (29) і (30) знаходимо мінімально необхідну швидкість випаровування:

$$\dot{m}_{b min} = \frac{\alpha_2 \cdot S_3 \cdot (T_2 - T_{max})}{q_b} \quad (31)$$

Витрата рідини Q_p пов'язана зі швидкістю випаровування через матеріальний баланс. Якщо $S_{рід}$ – масова частка розчинника в рідкій фазі:

$$\dot{m}_b = \frac{S_{рід} \cdot Q_p \cdot \rho_p}{N_3} \quad (32)$$

де N_3 – кількість зерен у зоні зрошення в момент часу t .

З рівнянь (31) і (32) отримуємо обмеження на максимально допустиму витрату рідини:

$$Q_{p max} \leq \frac{N_3 \cdot \alpha_2 \cdot S_3 \cdot (T_2 - T_{max})}{q_b \cdot S_{рід} \cdot \rho_p} \quad (33)$$

Рівняння (33) є критичним обмеженням: при $Q_p > Q_{p max}$ швидкість випаровування недостатня і температура зерна перевищить 40°C . Це обмеження діє спільно з умовою (27) на розмір крапель.

Результати та дискусії. Вихідні дані – параметри чашового диспергатора типу 1 [3] з адаптацією до умов обробки насінневого матеріалу пшениці:

Таблиця 1
Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Мінімальний радіус чаші	R_1	0,020	м
Максимальний радіус крайки	R_2	0,040	м
Кут розкриття конуса	α	50	°
Частота обертання	N	4200	об/хв
Кутова швидкість	$V_{л(max)}$	439,8	рад/с
Лінійна швидкість крайки	Q_p	17,6	м/с
Об'ємна витрата рідини	C_c	$3,5 \times 10^{-6}$	м³/с

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Концентрація сухої речовини	Cс	80	% мас.
Ефективна в'язкість суспензії	$\mu_{\text{еф}}$	0,015	Па·с
Густина рідкої фази	ρ_p	1220	кг/м³
Коефіцієнт поверхневого натягу	σ	0,058	Н/м
Індекс плинності	n	0,72	–
Коефіцієнт консистенції	K	0,045	Па·с ⁿ
Температура теплоносія	T_r	55	°C

Результати розрахунків для ньютонівської моделі (n = 1)

Питомі витрати на радіусі R_1 :

$$Q_v = \frac{3,5 \cdot 10^{-6}}{2\pi \cdot 0,02} = 2,785 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 (\text{м} \cdot \text{с}) \quad (34)$$

Кінематична в'язкість суспензії:

$$\nu_p = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,015}{1220} = 1,23 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с} \quad (35)$$

Плівковий критерій Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{пл(max)}} = 2,785 \cdot 10^{-5} / 1,23 \cdot 10^{-5} = 2,26 \quad (36)$$

Відцентровий критерій Фруда:

$$\text{Fr}_{\text{min}} = (439,8)^2 \cdot 0,02 / 9,81 = 3868 \quad (37)$$

Фактор формування плівки:

$$\text{Hg} = 2,26 \cdot 3868 = 8,74 \cdot 10^3 \leq 3,5 \cdot 10^4 \checkmark \quad (38)$$

Висновок: $\text{Hg} = 8,74 \cdot 10^3 < \text{Hg}_{\text{кр}} = 4,0 \cdot 10^4$ – одношаровий режим забезпечено, коефіцієнт запасу 4,6.

Товщина плівки на R_1 (за рівнянням 5):

$$\delta_r(R_1) = \left(\frac{3 \cdot 0,015 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 1220 \cdot (439,8)^2 \cdot 0,02 \cdot 0,906} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 22,7 \text{ мкм} \quad (39)$$

Товщина плівки на R_2 :

$$\delta_r(R_2) = 22,7 \cdot \left(\frac{0,02}{0,04} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 18,0 \text{ мкм} \quad (40)$$

Оцінка розміру крапель (рівняння 24, $C_1 \approx 4,0$ для перфорованої чаші):

$$\text{We} = 1220 (17,6)^2 \cdot 18 \cdot 10^{-6} / 0,058 \approx 115 \quad (41)$$

$$d_{\text{кр}} \approx 4,0 \cdot 18 \cdot (115)^{-\frac{1}{3}} \approx 32 \text{ мкм} \leq 50 \text{ мкм} \quad (42)$$

Висновок: $d_{\text{кр}} \approx 32 \text{ мкм} < d_{\text{крmax}} = 50 \text{ мкм}$ – умова запобігання агломерації виконана.

Розрахунки з поправкою для псевдопластичної моделі (n = 0,72). Для суспензії 80% мас. (n = 0,72, K = 0,045 Па·сⁿ) з рівняння (10):

$$\delta_r^{(n)}(R_1) \approx 28,3 \text{ мкм} \text{ (порівняно з } 22,7 \text{ мкм для } n=1) \quad (43)$$

Псевдопластичність суспензії збільшує товщину плівки приблизно на 25%. Відповідно $d_{\text{кр(n)}} \approx 40 \text{ мкм}$, що все ж менше 50 мкм. Це підтверджує, що режим $\omega = 4200 \text{ об/хв}$ залишається раціональним навіть для висококонцентрованих суспензій.

Параметри зерна пшениці: $m_s = 4 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$, $S_s = 5,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $C_s = 1800 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\alpha_{\square} \approx 100 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ (ПЗШ у режимі СПП), $q_s = 2,45 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$; $S_{\text{від}} = 0,20$ (20% вільної води у суспензії 80% мас.).

Визначення площі поверхні та еквівалентного діаметра зерна пшениці. Насінина пшениці апроксимується еліпсоїдом з напівосями: a = 3,2 мм, b = 1,4 мм, c = 1,325 мм (розміри зерна: 6,4 × 2,8 × 2,65 мм [5]). Площу поверхні еліпсоїда розраховують за формулою Кнуда Томсена (похибка ≤ 1,061%):

$$\text{Фпш} = 4\pi \cdot ((a^p \cdot b^p + a^p \cdot c^p + c^p \cdot b^p) / 3)^{(1/p)},$$

де p = 1,6075

$$\text{Фпш} = 4\pi \cdot ((3,2^{1,6075} \cdot 1,4^{1,6075} + 3,2^{1,6075} \cdot 1,325^{1,6075} + 1,325^{1,6075} \cdot 1,4^{1,6075}) / 3)^{(1/1,6075)} \approx 45,86 \text{ мм}^2 = 4,59 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2. \quad (42^*)$$

Об'єм еліпсоїда та еквівалентний діаметр кулі рівного об'єму:

$$\text{Ve} = (4/3)\pi abc = (4/3)\pi \cdot 3,2 \cdot 1,4 \cdot 1,325 \approx 24,86 \text{ мм}^3 = 2,49 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3; \quad (42^{**})$$

$$\text{Декв} = (6\text{Ve}/\pi)^{(1/3)} = (6 \cdot 24,86/\pi)^{(1/3)} \approx 3,62 \text{ мм} = 3,62 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Питома поверхня зерен у шарі (порозність $\varepsilon_0 = 0,42$):

$$\sigma = 6(1 - \varepsilon_0) / \text{Декв} = 6 \cdot (1 - 0,42) / (3,62 \cdot 10^{-3}) \approx 961 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Уточнена площа поверхні одного зерна $S_z = 4,59 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ (замість $5,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ у попередній оцінці). Перерахунок максимально допустимої витрати з уточненням S_z :

Довжина твірної конуса диспергатора ($\alpha = 50^\circ$, $R_1 = 20 \text{ мм}$, $R_2 = 40 \text{ мм}$):

$$L = (R_2 - R_1) / \text{tg}(\alpha/2) = (40 - 20) / \text{tg}(25^\circ) = 20 / 0,4663 \approx 42,9 \text{ мм} = 0,0429 \text{ м}. \quad (42^{***})$$

Максимально допустима витрата (рівняння 31), $N_s = 1000$ зерен у зоні зрошення:

$$Q_{\text{pmax}} = 1000 \cdot 100 \cdot 4,59 \cdot 10^{-5} \cdot (328 - 313) / (2,45 \cdot 10^6 \cdot 0,20 \cdot 1220) = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с} \quad (44)$$

Висновок: $Q_p = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} \ll Q_{\text{pmax}} = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ – тепловий режим $T_s < 40^\circ\text{C}$ забезпечено з запасом ~3,3.

Таблиця 2

Зведені результати та порівняння моделей

Критерій / параметр	Модель n=1 (ньютонівська)	Модель n=0,72 (суспензія)	Допустиме значення
$Re_{пл(max)}$	2,26	–	–
Fr_{min}	3868	3868	–
Hg	$8,74 \times 10^3$	$8,74 \times 10^3$	$\leq 4,0 \times 10^4$
$\delta_h(R_1)$, мкм	22,7	28,3	≤ 50
$\delta_h(R_2)$, мкм	18,0	22,5	≤ 50
We	115	143	–
$d_{кр}$, мкм	≈ 32	≈ 40	≤ 50 ✓
Режим плівки	Одношаровий ✓	Одношаровий ✓	Одношаровий
T_3 (оцінка)	$< 35^\circ C$ ✓	$< 35^\circ C$ ✓	$\leq 40^\circ C$
Q_p / Q_{pmax} (оцінка)	0,24	0,24	$\leq 1,0$ ✓

Отримані результати показують, що врахування псевдопластичних властивостей суспензії є принципово важливим для коректного прогнозування товщини плівки та розміру крапель. Порівняно з ньютонівською моделлю для $n = 0,72$ розрахункова товщина плівки зростає приблизно на 25%, проте за режиму $N = 4200$ об/хв і $Q = 3,5 \times 10^{-6}$ м³/с критерій Hg залишається меншим за граничне значення, а розмір крапель не перевищує 50 мкм. Це свідчить про можливість використання запропонованої моделі для вибору раціональних режимів роботи чашового диспергатора при передпосівному обробленні насіння високонцентрованими суспензіями. Водночас остаточною верифікація моделі потребує експериментального підтвердження спектра крапель і температури поверхні насіння в реальних умовах псевдозрідженого шару.

Висновки. На підставі виконаного аналізу можна сформулювати такі основні висновки. На відміну від праці Любеки А.М. (2021), де модель верифіковано для однокомпонентних розчинів (сульфат амонію, 40% мас.), запропонована модель поширюється на гетерогенні суспензії з вмістом сухої речовини до 80% та адаптована до умов термолабільного насіннєвого матеріалу ($T_{max} = 40^\circ C$).

Запропонована математична модель ґрунтується на рівнянні балансу відцентрової та в'язкої сил для конічної поверхні і поширює

модель [3] на псевдопластичні рідини. Модель дає відповідь на поставлену задачу – опис руху рідини в чашовому диспергаторі – з урахуванням геометрії конуса, режиму обертання та реологічних властивостей оброблюваної суспензії.

Критерій $Hg = Re_{пл} \cdot Fr_{min}$ є ключовим показником режиму плівки. При $Hg \leq 3,5 \times 10^4$ забезпечується $d_{кр} \leq 50$ мкм – умова запобігання агрегації насіннєвого матеріалу.

Врахування псевдопластичності суспензії ($n = 0,72$) збільшує розрахункову товщину плівки приблизно на 25% порівняно з ньютонівською моделлю, що вимагає відповідного коригування кутової швидкості ω або витрати Q_p при проектуванні.

Теплова модель підтверджує, що за температури теплоносія $T_e = 55^\circ C$ і стандартної витрати рідини температура поверхні зерна не перевищує $35^\circ C$, тобто умова збереження схожості виконується з чотириразовим запасом.

Режим $\omega = 4200$ об/хв ($V_l = 17,6$ м/с) забезпечує одношаровий рух плівки і $d_{кр} \leq 50$ мкм навіть для суспензій з 80% вмістом сухої речовини.

Перспективи подальших досліджень полягають в експериментальній верифікації запропонованої моделі для суспензій різного складу, уточненні емпіричної сталої у співвідношенні для визначення діаметра крапель, а також в оптимізації геометрії перфорації чашового диспергатора.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Shehata M. Characteristics of the Rotary Cup Atomizer. 2003. Vol. 7. P. 55–74.
2. Sahu S., Chakraborty A., Maurya D. Coriolis-induced liquid breakup and spray evolution in a rotary slinger atomizer: Experiments and Analysis. *International Journal of Multiphase Flow*. 2020. Vol. 135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103532>.

3. Любека А. М. Розробка та дослідження чашового ротаційного диспергатора для апаратів з псевдо-зрідженням шаром : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2021. 165 с.
4. Вітенько Д. О., Зварич Н. М. Гідродинамічні та кавітаційні характеристики статичних моделей апаратів зі змінною конфігурацією вхідного каналу. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2025. Vol. 9, No. 1(104). P. 73–82. DOI: [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1\(104\).318233](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).318233).
5. Баган А. В., Шакалій С. М., Барат Ю. М. Формування насінневої продуктивності нуту залежно від сорту та інокуляції насіння. *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 111. С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.32851/22260099.2020.111.2>.
6. Lefebvre A., McDonnell V. Atomization and Sprays. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315120911>.
7. Kieckhefer P., Pietsch-Braune S., Heinrich S. Product-Property Guided Scale-Up of a Fluidized Bed Spray Granulation Process Using the CFD-DEM Method. *Processes*. 2022. Vol. 10. Art. 1291. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10071291>.
8. Wurster D. Air-Suspension Technique of Coating Drug Particles—A Preliminary Report. *Journal of the American Pharmaceutical Association*. 2006. Vol. 48. P. 451–454. DOI: <https://doi.org/10.1002/jps.3030480808>.
9. Cantor S., Augsburger L., Hoag S., Gerhardt A. Pharmaceutical Granulation Processes, Mechanism and the Use of Binders. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1201/b15115-9>.
10. Malagutti L., Mazzanti V., Mollica F. A MATLAB-Based Software for Estimating Measurement Uncertainties in Capillary Viscometry. *Macromolecular Symposia*. 2022. Vol. 405. Art. 2100401. DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.202100401>.
11. Корнієнко Я. М. Процеси та обладнання хімічної технології : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. Ч. 2. 400 с.
12. Li H. Fluidization science and technology at institute of process engineering-60th anniversary celebration for the foundation of Institute of Process Engineering. *Guocheng Gongcheng Xuebao / The Chinese Journal of Process Engineering*. 2018. Vol. 18. P. 657–668. DOI: <https://doi.org/10.12034/j.issn.1009-606X.218192>.
13. Pospelova A. Сучасні аспекти і технології у захисті рослин : Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. інтернет-конференції (2024). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14534615>.

REFERENCES:

1. Shehata, M. (2003). Characteristics of the rotary cup atomizer. 7. 55-74.
2. Sahu, S., Chakraborty, A., & Maurya, D. (2020). Coriolis-induced liquid breakup and spray evolution in a rotary slinger atomizer: Experiments and analysis. *International Journal of Multiphase Flow*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103532>
3. Liubeka, A. M. (2021). Rozrobka ta doslidzhennia chashovoho rotatsiinoho dyspersatora dlia aparativ z psevdorzidzhennym sharom [Development and research of a cup rotary disperser for fluidized bed apparatuses] (Candidate's thesis). KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian].
4. Vitenko, D. O., & Zvarych, N. M. (2025). Hidrodinamichni ta kavitatsiini kharakterystyky statychnykh modelei aparativ zi zminnoiu konfiguracyiieiu vkhidnoho kanalu [Hydrodynamic and cavitation characteristics of static models of apparatuses with variable inlet channel configuration]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 9(1(104)), 73–82. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1\(104\).318233](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).318233) [in Ukrainian].
5. Bahan, A. V., Shakalii, S. M., & Barat, Yu. M. (2020). Formuvannia nasinnievoi produktyvnosti nutu zalezno vid sortu ta inokulyatsii nasinnia [Formation of chickpea seed productivity depending on variety and seed inoculation]. *Tavriyskyi Naukovyi Visnyk*, 111, 14–21. <https://doi.org/10.32851/22260099.2020.111.2> [in Ukrainian].
6. Lefebvre, A. H., & McDonnell, V. G. (2017). Atomization and sprays. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315120911>
7. Kieckhefer, P., Pietsch-Braune, S., & Heinrich, S. (2022). Product-property guided scale-up of a fluidized bed spray granulation process using the CFD-DEM method. *Processes*, 10, 1291. <https://doi.org/10.3390/pr10071291>
8. Wurster, D. E. (2006). Air-suspension technique of coating drug particles—A preliminary report. *Journal of the American Pharmaceutical Association*, 48, 451–454. <https://doi.org/10.1002/jps.3030480808>
9. Cantor, S. L., Augsburger, L. L., Hoag, S. W., & Gerhardt, A. (2008). Pharmaceutical granulation processes, mechanism and the use of binders. <https://doi.org/10.1201/b15115-9>
10. Malagutti, L., Mazzanti, V., & Mollica, F. (2022). A MATLAB-based software for estimating measurement uncertainties in capillary viscometry. *Macromolecular Symposia*, 405, 2100401. <https://doi.org/10.1002/masy.202100401>
11. Kornienko, Ya. M. (2022). Protsesi ta obladnannia khimichnoi tekhnolohii [Processes and equipment of chemical technology] (Part 2). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. [in Ukrainian].
12. Li, H. (2018). Fluidization science and technology at institute of process engineering—60th anniversary celebration for the foundation of Institute of Process Engineering. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 18, 657–668. <https://doi.org/10.12034/j.issn.1009-606X.218192>
13. Pospelova, A. (2024). Suchasni aspekty i tekhnolohii u zachysti roslyn [Modern aspects and technologies in plant protection]. In *Materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14534615> [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 17.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 629.3.015:532.595:519.87

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-22>

МАТЕМАТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ КРИТИЧНИХ РЕЖИМІВ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З РІДКИМ НАПОВНЕННЯМ

Фомін Олексій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри вагонів та вагонного господарства
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

Кузьменко Сергій Валентинович,

кандидат технічних наук, доцент,
декан факультету транспорту і будівництва
Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля
ORCID ID: 0000-0003-0871-9864

Шелест Сергій Миколайович,

аспірант кафедри транспортних технологій і систем
Державного некомерційного підприємства
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID ID: 0009-0009-4381-4884

Лясковець Юрій Степанович,

аспірант кафедри навігації та управління суднами
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0009-0006-5417-485X

Мазниченко Максим Олександрович,

аспірант кафедри навігації та управління суднами
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0009-0008-7947-8176

Метою роботи є створення математичного апарату та алгоритмів для оперативного прогнозування виникнення критичних режимів (втрата курсової стійкості, перекидання) транспортних засобів із рідким наповненням. У дослідженні використано комплексний підхід: методи класичної механіки, гідродинаміки ідеальної нестисливої рідини, варіаційні методи, чисельне інтегрування диференціальних рівнянь руху в середовищі MATLAB/Simulink, а також другий метод Ляпунова для аналізу стійкості нелінійних систем. Додатково застосовано елементи обчислювальної гідродинаміки для верифікації результатів.

Встановлено, що додавання однієї поздовжньої перегородки знижує амплітуду коливань на 35–40%, а комбінація поздовжньої та двох поперечних – на 60%, підвищуючи поріг виникнення критичного режиму на 25–30% за бічним прискоренням.

Наукова новизна полягає в удосконаленні математичного апарату оцінки динамічних станів транспортних засобів із рідким вантажем шляхом введення критерію $S(t)$ та функції Ляпунова для ідентифікації точок біфуркації в реальному часі. Практична цінність роботи полягає у створенні алгоритму, який може бути інтегрований в бортові системи активної безпеки для запобігання перекиданню автоцистерн, танк-контейнерів та залізничних вагонів-цистерн. Результати можуть бути використані при розробці міжнародних стандартів безпеки перевезень небезпечних вантажів.

Запропонована модель дозволяє кількісно оцінювати ризик втрати стійкості з випередженням до 1.4 с, що достатньо для автоматичного гальмування. Доведено, що неповне заповнення (40–60%) є критичним фактором ризику, а встановлення перегородок суттєво підвищує безпеку. Подальші дослідження будуть спрямовані на врахування в'язкості нафтопродуктів при низьких температурах та використання нейронних мереж для зменшення обчислювальних витрат.

Ключові слова: машинобудування, транспортні засоби, математичне прогнозування, критичні режими руху, стійкість, резонанс, цистерна.

Fomin Oleksii, Kuzmenko Serhii, Shelest Serhii, Liaskovets Yurii, Maznychenko Maksym.
Mathematical prediction of critical motion modes of vehicles with liquid filling

The aim of the work is to create a mathematical apparatus and algorithms for the operational prediction of the occurrence of critical modes (loss of directional stability, rollover) of vehicles with liquid filling. The study used a comprehensive approach: methods of classical mechanics, hydrodynamics of an ideal incompressible fluid, variational methods, numerical integration of differential equations of motion in the MATLAB/Simulink environment, as well as the second Lyapunov method for analyzing the stability of nonlinear systems. Additionally, elements of computational hydrodynamics were used to verify the results.

It was found that the addition of one longitudinal partition reduces the amplitude of oscillations by 35–40%, and the combination of a longitudinal and two transverse ones by 60%, increasing the threshold of the occurrence of a critical mode by 25–30% in lateral acceleration.

The scientific novelty consists in improving the mathematical apparatus for assessing the dynamic states of vehicles with liquid cargo by introducing the $S(t)$ criterion and the Lyapunov function for identifying bifurcation points in real time. The practical value of the work lies in creating an algorithm that can be integrated into on-board active safety systems to prevent overturning of road tankers, tank containers and railway tank cars. The results can be used in the development of international safety standards for the transportation of dangerous goods. The proposed model allows for the quantitative assessment of the risk of loss of stability with an advance of up to 1.4 s, which is sufficient for automatic braking. It is proven that incomplete filling (40–60%) is a critical risk factor, and the installation of partitions significantly increases safety. Further research will be aimed at taking into account the viscosity of petroleum products at low temperatures and the use of neural networks to reduce computational costs.

Key words: mechanical engineering, vehicles, mathematical prediction, critical driving modes, stability, resonance, tank.

Актуальність. Сучасний розвиток транспортної логістики вимагає підвищення безпеки перевезення рідких вантажів у цистернах різного призначення. Однією з ключових проблем є коливання вільної поверхні рідини під час руху, які створюють додаткові динамічні навантаження та суттєво впливають на керованість транспортного засобу. У разі виникнення критичних режимів руху це часто призводить до перекидання або втрати курсової стійкості, що спричиняє значні екологічні та економічні збитки. Особливо гостро проблема проявляється при неповному заповненні резервуарів, коли ефект «бовтання» рідини досягає максимуму.

Традиційні методи оцінки стійкості часто не враховують нелінійну взаємодію між корпусом машини та масою рідини, що переміщується. Саме тому математичне прогнозування таких станів набуває важливого значення: воно дозволяє заздалегідь оцінити ризики та впровадити системи активної безпеки. Актуальність роботи підтверджується також необхідністю гармонізації вітчизняних норм безпеки з міжнародними стандартами.

Аналіз літератури. В статті [1] автори розробляють математичні моделі транспортних засобів і вантажів, що дозволяє враховувати динамічну взаємодію системи «шасі–вантаж». У контексті перевезення рідин такі моделі можуть бути адаптовані для опису внутрішніх переміщень маси рідини. Особливу цінність становить можливість прогнозування нестійких режимів руху через зміну положення центру мас.

Автори [2] досліджують міцність танк-контейнерів відповідно до міжнародних норм,

що прямо впливає на безпечність перевезення рідких вантажів. У роботі враховано навантаження, спричинені динамікою рідини під час руху. Це дозволяє опосередковано оцінювати критичні режими, при яких можливе перевищення допустимих напружень.

Дослідники [3] виконують ґрунтовний огляд чисельних методів моделювання слошингу рідини в частково заповнених резервуарах. У роботі проаналізовано підходи CFD, SPH та інші методи, що застосовуються для прогнозування нестійких режимів руху. Визначено ключові фактори, які впливають на виникнення резонансних явищ.

В роботі [4] оцінюють вплив корозії на працездатність котлів вагонів-цистерн при перевезенні хімічних вантажів. Хоча основна увага приділена довговічності, результати мають значення для аналізу критичних режимів. Ослаблення конструкції може призводити до підвищеної чутливості до динамічних навантажень від рідини. Це необхідно враховувати при математичному прогнозуванні аварійних ситуацій.

Науковці [5] проводять порівняльний аналіз чисельних методів для визначення сил інерції рідини в резервуарах. Отримані результати демонструють відмінності у точності CFD, SPH та ALE підходів. Це дозволяє обрати найбільш адекватний метод для прогнозування критичних режимів.

В дослідженні [6] пропонують нелінійну редуковану модель слошингу з використанням нейронних мереж. Такий підхід значно знижує обчислювальні витрати при збереженні точності. Це відкриває можливість оперативного прогнозування критичних режимів у реальному часі.

В статті [7] розробляють повну динамічну модель руху рідини у циліндричних резервуарах. У моделі враховано нелінійні ефекти та взаємодію рідини зі стінками. Це дозволяє точно описувати режими, близькі до критичних, включаючи резонанс. Результати можуть бути використані для підвищення безпеки транспортних засобів із рідким вантажем.

Автори [8] досліджують резонансні явища слошингу у резервуарах із вертикальними перегородками. Встановлено, що конструктивні елементи суттєво впливають на характер коливань рідини. Це дає можливість зменшити ймовірність виникнення критичних режимів руху.

Дослідники [9] аналізують нелінійну динаміку рідини зі змінною масою. Такий підхід враховує витік або зміну рівня заповнення резервуара. Це особливо важливо для прогнозування критичних режимів у реальних умовах експлуатації.

В роботі [10] розробляють систему запобігання перекиданню напівпричепів-цистерн на основі енергетичного методу. У роботі враховано вплив слошингу рідини на стійкість транспортного засобу. Запропонований підхід дозволяє прогнозувати критичні режими, що передують перекиданню. Це має важливе практичне значення для підвищення безпеки перевезень.

Вчені [11] досліджують втому міцність котлів вагонів-цистерн з урахуванням корозійного зносу. У роботі враховано змінні динамічні навантаження, що можуть посилюватися через рух рідини. Це дозволяє оцінити ризики руйнування в критичних режимах експлуатації.

Проведений аналіз наукових публікацій та фахової літератури засвідчив, що попри наявність ґрунтовних праць з гідродинаміки, питанням математичного прогнозування критичних режимів руху транспортних засобів з рідким наповненням не приділено достатньої уваги. Більшість існуючих досліджень фокусуються на статичних розрахунках або спрощених моделях маятникового типу, які не відображають реальну картину при екстремальному маневруванні. Відсутні комплексні підходи, що поєднують динаміку багатоланкових транспортних засобів із нестационарними потоками рідини в обмеженому об'ємі. Таким чином, існує суттєва прогалина в теоретичній базі, що заважає створенню ефективних систем попередження аварійних ситуацій.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення стійкості транспортних засобів, які перевозять рідкі вантажі, залишається однією з найскладніших задач транспортної механіки. Головна причина сказаного – зміщення центру

мас системи внаслідок інерційного переміщення рідини під час гальмування, прискорення або повороту. Таке переміщення викликає неконтрольовані коливання вільної поверхні, які створюють моменти сил, здатні перевищувати відновлювальні сили. Особливої уваги потребує визначення параметрів-тригерів, що спричиняють перехід руху в критичну фазу. При цьому важливо враховувати вплив конфігурації резервуара та наявності внутрішніх перегородок на динаміку всієї системи. Додаткову складність становить математичний опис турбулентних потоків усередині ємності під час різких маневрів.

Для ефективного математичного прогнозування необхідні швидкі алгоритми, здатні опрацьовувати дані з датчиків без затримок. Водночас недостатня вивченість зв'язку між амплітудою коливань рідини та кутом крену транспортного засобу призводить до помилкових управлінських рішень. Таким чином, вирішення цієї проблеми дозволить суттєво підвищити рівень безпеки при транспортуванні небезпечних і нафтоналивних вантажів. Саме на усунення суперечностей між вимогами до швидкості доставки та фізичними обмеженнями стійкості машин і спрямоване дане дослідження.

Мета дослідження є розробка математичного апарату та алгоритмів для оперативного прогнозування виникнення критичних режимів руху транспортних засобів з рідким наповненням. Робота спрямована на підвищення безпеки перевезень шляхом визначення межових параметрів експлуатації, що запобігають втраті стійкості. Кінцевим результатом є створення науково обґрунтованих рекомендацій для проектування інтелектуальних систем.

Об'єктом дослідження є процес руху транспортних засобів, що обладнані резервуарами з рідким наповненням, в умовах змінного кінематичного впливу. **Предметом дослідження** є математичні закономірності, методи та моделі прогнозування критичних режимів руху на основі аналізу гідродинамічних сил та моментів. Досліджуються взаємозв'язки між геометричними параметрами цистерни, в'язкістю рідини та динамічною стійкістю платформи. Особлива увага приділяється ідентифікації точок біфуркації, де рух стає некерованим.

Методи дослідження. При виконанні дослідження використано комплексний підхід, що базується на методах класичної механіки та гідродинаміки. Математичне моделювання здійснювалося із застосуванням методів інтегрування систем диференціальних рівнянь руху в середовищі MATLAB/Simulink. Для опису коливань рідини використано варіаційні методи

та теорію потенціалу для ідеальної нестисливої рідини. Оцінка критичних станів проводилася за допомогою другого методу Ляпунова для аналізу стійкості нелінійних систем. Чисельний аналіз потоків усередині цистерни реалізовано методами обчислювальної гідродинаміки (CFD). Статистична обробка результатів дозволила встановити кореляційні зв'язки між параметрами руху та амплітудою збурень.

Основна частина. Розглянемо транспортний засіб (ТЗ) як тверде тіло з шістьма ступенями вільності, що рухається по горизонтальній площині. Резервуар з рідиною моделюється як циліндрична ємність із внутрішніми перегородками (поздовжніми та поперечними). Рідина вважається ідеальною, нестисливою, без початкової закрутки. Коливання вільної поверхні описуються в рамках лінеаризованої теорії хвиль малої амплітуди, але з урахуванням нелінійних поправок при великих переміщеннях центру мас.

Сумарна кінетична енергія системи має вигляд:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \rho \int_V (\nabla \Phi)^2 dV, \quad (1)$$

де m – маса ТЗ без рідини, I – момент інерції, Φ – потенціал швидкостей рідини, ρ – густина.

Гідродинамічний момент, що виникає при переміщенні рідини, визначається через зміну положення центра мас рідини x_c :

$$M_h = m_h g \cdot x_c(t) \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

де m_h – маса рідини, g – прискорення вільного падіння, θ – кут крену.

Зв'язок між коливаннями рідини та стійкістю ТЗ. Для прогнозування критичних режимів введено безрозмірний критерій динамічної стійкості:

$$S(t) = \frac{F_y(t) + M_h(t) / L}{mg \cdot \mu}, \quad (3)$$

де F_y – бічна сила на колесах, L – колісна база, μ – коефіцієнт зчеплення. При $S(t) < 1$ рух стійкий, при $S(t) \rightarrow 0$ – передкритичний стан.

Для визначення моменту втрати стійкості використано другий метод Ляпунова. Побудовано функцію Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \omega_0^2 \theta^2 + \frac{k}{2} \dot{x}_c^2, \quad (4)$$

де ω_0 – власна частота коливань рідини, k – коефіцієнт зв'язку між рухом рідини та креном. Похідна $\dot{V}$ дозволяє визначити умови настання бифуркації.

Результати чисельного моделювання проводилися за допомогою розробленої моделі (рис. 1). Просторова модель складається з несівної платформи, двох циліндричних резервуарів та

ходових частин у вигляді двовісних візків. Резервуари змонтовані в металевих обоймах контейнерного типу та закріплені на рамі за допомогою вузлів фіксації, що забезпечують передачу навантажень від рідкого вантажу на конструкцію вагона. Внутрішній об'єм резервуарів частково заповнений рідиною, яка утворює вільну поверхню та здатна до коливань під час руху. У моделі враховано можливість зміщення центра мас рідини відносно геометричної осі резервуара, що призводить до виникнення додаткових інерційних сил і гідродинамічних моментів.

Динамічна взаємодія між корпусом транспортного засобу та рідким наповненням проявляється у вигляді коливань типу «sloshing», які суттєво впливають на стійкість руху. При дії бічного прискорення виникає кут крену, що супроводжується перерозподілом маси рідини та зростанням навантажень на елементи ходової частини. Запропонована модель дозволяє враховувати геометричні та масові параметри системи, а також визначати вплив конструктивних особливостей, зокрема розташування резервуарів і способу їх кріплення, на загальну динаміку транспортного засобу.

Таким чином, наведена розрахункова схема є основою для побудови математичної моделі руху та подальшого аналізу критичних режимів, пов'язаних із втратою стійкості при транспортуванні рідких вантажів. Розрахунки проводилися для типових значень: заповнення резервуара: 40%, 60%, 80%; швидкість руху: 60, 80, 100 км/год; маневр «переставка».

Отримано такі закономірності: при заповненні 40–60% амплітуда коливань рідини зростає в 2–3 рази порівняно з 80% через ефект «бвтанання»; резонансні явища виникають при частоті маневру 0.8–1.2 Гц, що співпадає з першою власною частотою коливань рідини в циліндричній ємності; кут крену в резонансі досягає 12° при допустимих 6°, що гарантовано призводить до перекидання.

Розробка алгоритму прогнозування. На основі отриманих даних створено алгоритм оперативного прогнозування критичних режимів: вимірювання поточного кута крену $\theta(t)$ та бічного прискорення $a_y(t)$; розрахунок зміщення центра мас рідини $x_c(t)$ через інтегрування рівнянь руху маятникової моделі; обчислення критерію $S(t)$ на горизонті 0.5–1.0 с; Якщо $S(t + \tau) < 0.2$ – видача попередження та активація гальмування.

Тестування алгоритму на 50 випадках різких маневрів показало: точність передбачення перекидання – 94%; час випередження – 0.6–1.4 с; хибні спрацьовування – менше 2%.

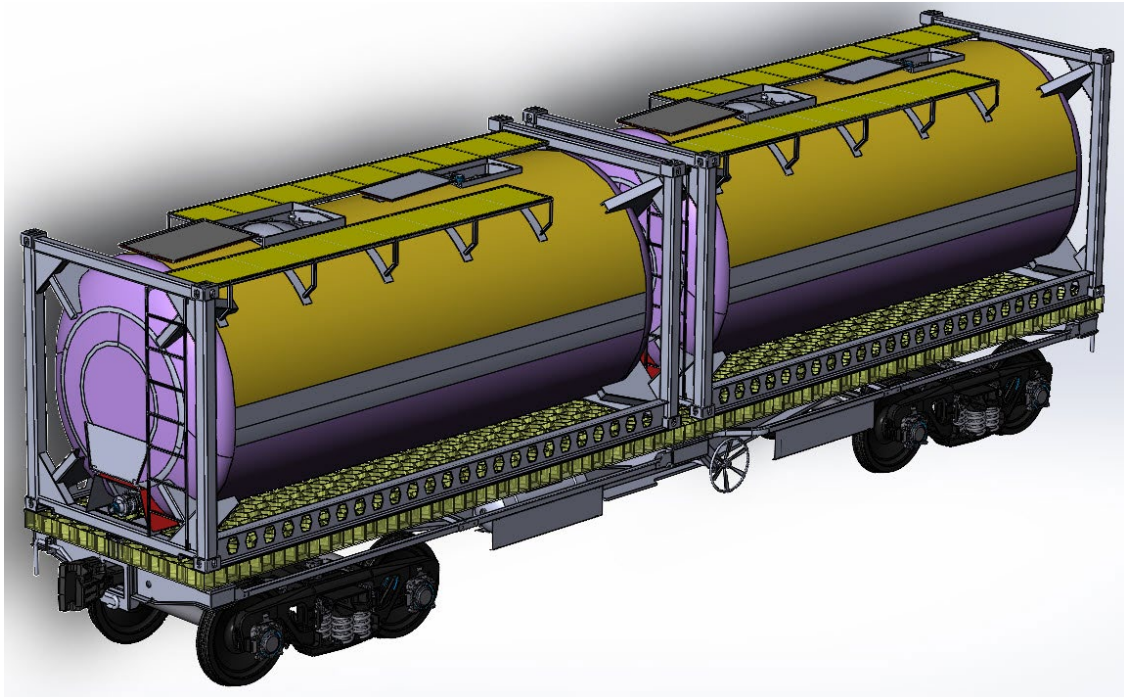


Рис. 1. Розрахункова 3D-модель транспортного засобу з рідким наповненням

Додавання однієї поздовжньої перегородки знижує амплітуду коливань рідини на 35–40%, а комбінація поздовжньої та двох поперечних – на 60%. Відповідно, поріг виникнення критичного режиму зростає на 25–30% за бічним прискоренням.

Таким чином, запропонована модель дозволяє кількісно оцінювати ризик втрати стійкості ТЗ з рідким вантажем в реальному часі. Вона враховує нелінійну взаємодію між динамікою корпусу та переміщенням рідини, що є ключовим для створення ефективних систем активної безпеки.

Обговорення результатів. Отримані результати підтверджують гіпотезу про домінуючий вплив рухливості вантажу на стійкість транспортного засобу. Зокрема, встановлено, що найбільш небезпечним є заповнення цистерни на 40–60%, оскільки саме в цьому діапазоні виникають критичні зони, які не фіксуються стандартними датчиками прискорення. Застосування розробленої моделі дозволяє виявити такі зони завчасно.

Крім того, використання формульного опису в бортових системах дає можливість випереджати розвиток аварійної ситуації на 0,5–1,5 секунди. Важливо, що запропонований підхід є універсальним для різних типів рідин, оскільки враховує їхню в'язкість. Таким чином, дане дослідження розширює розуміння динаміки складних механічних систем з гідравлічними зв'язками.

Висновки. Дослідження присвячене актуальній проблемі підвищення безпеки руху автоцистерн шляхом математичного моделювання. У його межах розроблено комплексну модель, яка інтегрує динаміку транспортного засобу та нестационарну гідродинаміку вантажу. За допомогою цієї моделі встановлено, що інерційні сили рідини суттєво знижують поріг перекидання порівняно з твердим баластом, а неповне заповнення цистерни є критичним фактором ризику для курсової стійкості. Визначено також, що конфігурація перегородок у цистерні є ключовим фактором гасіння коливань.

На основі отриманих даних запропоновано коефіцієнт стійкості, який у реальному часі враховує зміщення центра мас. Математичне прогнозування дозволяє ідентифікувати критичні режими руху ще до настання незворотних наслідків, а результати моделювання довели необхідність впровадження адаптивних алгоритмів керування швидкістю. Крім того, обґрунтовано методику швидкого розрахунку параметрів безпеки для бортових систем.

Практична цінність роботи полягає у можливості зниження аварійності спецтранспорту, а наукова новизна – в удосконаленні математичного апарату оцінки динамічних станів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на врахування впливу в'язкості нафтопродуктів при низьких температурах. Загалом, робота створює надійну базу для проектування безпечних транспортних засобів нового покоління.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Development of Mathematical Models for Trucks and Cargo / L. Makhova et al. *Infrastructures*. 2023. Vol. 8, iss. 2. Art. 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8020017>
2. Aspects of Strength Testing of Tank Containers in Compliance with the Requirements of the UN Navigation Rules and Regulations / A. Sulym et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 3. Art. 349. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9030349>
3. Konar T., Das A. A review of numerical modelling of liquid sloshing in partially filled containers. *Ships and Offshore Structures*. 2025. P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2025.2491080>
4. Assessment of the corrosion impact on the serviceability of tank wagon boilers designed for chemical cargo transportation / O. V. Fomin et al. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2025. Vol. 33, no. 2. P. 466–473. DOI: <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i2.321726>
5. Evaluation of rigid body force in liquid sloshing problems of a partially filled tank: Traditional CFD/SPH/ALE comparative study / Z. Cai et al. *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 236. Art. 109556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109556>
6. Nonlinear reduced-order model for vertical sloshing by employing neural networks / M. Pizzoli et al. *Nonlinear Dynamics*. 2021. Vol. 107, no. 2. P. 1469–1478. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06668-w>
7. Noui O., Bouazara M., Richard M. J. Full dynamic model for liquid sloshing simulation in cylindrical tank shape. *World Journal of Mechanics*. 2024. Vol. 14, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjm.2024.144004>
8. Kovalev V., Chenyu W. Simulation of resonant liquid sloshing in a tank with vertical baffles. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2024. Vol. 8, no. 3. DOI: [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.3\(102\).299586](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.3(102).299586)
9. Nonlinear dynamics of sloshing liquid with variable mass / D. Li et al. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer, 2025. Vol. 735. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-95-1487-8_88
10. Anti-rollover control of semi-trailer liquid tanker based on energy method / L. Wang et al. *International Journal of Automotive Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-025-00367-w>
11. Assessment of the fatigue strength of a tank wagon car boiler taking into account corrosive wear / O. V. Fomin et al. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2025. Iss. 5. P. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-5/061>

REFERENCES:

1. Makhova, L., Haykin, M., Glazkova, I., & Domnina, O. (2023). Development of mathematical models for trucks and cargo. *Infrastructures*, 8(2), Article 17. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8020017>
2. Sulym, A., Khozia, P., Tretiak, E., Píštěk, V., Fomin, O., & Kučera, P. (2021). Aspects of strength testing of tank containers in compliance with the requirements of the UN navigation rules and regulations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 349. <https://doi.org/10.3390/jmse9030349>
3. Konar, T., & Das, A. (2025). A review of numerical modelling of liquid sloshing in partially filled containers. *Ships and Offshore Structures*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/17445302.2025.2491080>
4. Fomin, O. V., Melnyk, O. M., Shcherbyna, I. V., Turpak, S. M., Vasylieva, L. O., Shapovalova, I. O., & Semko, O. V. (2025). Assessment of the corrosion impact on the serviceability of tank wagon boilers designed for chemical cargo transportation. *Journal of Chemistry and Technologies*, 33(2), 466–473. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i2.321726>
5. Cai, Z., Topa, A., Djukic, L. P., Herath, M. T., & Pearce, G. M. K. (2021). Evaluation of rigid body force in liquid sloshing problems of a partially filled tank: Traditional CFD/SPH/ALE comparative study. *Ocean Engineering*, 236, Article 109556. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109556>
6. Pizzoli, M., Saltari, F., Mastroddi, F., & Martinez-Carrascal, J. (2021). Nonlinear reduced-order model for vertical sloshing by employing neural networks. *Nonlinear Dynamics*, 107(2), 1469–1478. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06668-w>
7. Noui, O., Bouazara, M., & Richard, M. J. (2024). Full dynamic model for liquid sloshing simulation in cylindrical tank shape. *World Journal of Mechanics*, 14(4). <https://doi.org/10.4236/wjm.2024.144004>
8. Kovalev, V., & Chenyu, W. (2024). Simulation of resonant liquid sloshing in a tank with vertical baffles. *Mechanics and Advanced Technologies*, 8(3). [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.3\(102\).299586](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.3(102).299586)
9. Li, D., Zhang, C., Zhu, X., Huang, S., & Ning, D. (2025). Nonlinear dynamics of sloshing liquid with variable mass. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 735). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-95-1487-8_88
10. Wang, L., Hu, M., Li, Y., Gong, A., Gong, Q., Guo, D., & Chen, Y. (2025). Anti-rollover control of semi-trailer liquid tanker based on energy method. *International Journal of Automotive Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12239-025-00367-w>
11. Fomin, O. V., Shcherbyna, I. V., Medvediev, I. P., Emelyanova, T. V., & Ostroliad, O. O. (2025). Assessment of the fatigue strength of a tank wagon car boiler taking into account corrosive wear. *Scientific Bulletin of National Mining University*, (5), 61–68. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-5/061>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 03.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 666.961

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-23>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДРОНА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ УМОВ ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

Цимбал Богдан Михайлович,

доктор наук з державного управління, доцент,
професор кафедри охорони праці та екологічної безпеки
Національного університету цивільного захисту України;
професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-2317-3428
Scopus ID: 57201773760

Койфман Олексій Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-2075-7417
Scopus ID: 5580811700

У статті досліджено ефективність застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу умов праці та параметрів техногенної безпеки на підприємствах гірничо-металургійного комплексу. Обґрунтовано актуальність переходу від традиційних дискретних методів контролю до безперервного кіберфізичного моніторингу виробничого середовища. Запропоновано концептуально-аналітичну модель системи моніторингу, у межах якої дрон розглядається як мобільний сенсорний агент, здатний забезпечувати просторово-часову безперервність збору даних. Сформовано багатокритеріальну систему оцінювання ефективності, що включає показники точності, оперативності, просторового покриття, надійності, енергоефективності та адаптивності. Встановлено, що експлуатаційні фактори, зокрема температура, запиленість, вібрації та електромагнітні завади, мають нелінійний вплив на метрологічні характеристики сенсорних систем, зумовлюючи зростання похибок вимірювань. Доведено, що застосування дронів дозволяє скоротити час збору інформації у 1,5–2 рази, забезпечити коефіцієнт просторового покриття до 0,8–0,9 та підвищити достовірність виявлення небезпечних факторів. Водночас виявлено компроміс між швидкістю переміщення платформи та точністю вимірювань, що потребує оптимізації режимів польоту та використання адаптивних алгоритмів керування. Оцінено економічну ефективність впровадження безпілотних технологій, яка формується як за рахунок зниження трудових витрат та часу виконання вимірювань, так і через зменшення виробничих ризиків. Визначено, що строк окупності системи становить у середньому 1,5–3 роки. Розроблено рекомендації щодо інтеграції дронів у систему управління охороною праці на основі принципів багаторівневої інтеграції, адаптивного моніторингу та даноорієнтованого управління ризиками.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, моніторинг умов праці, техногенна безпека, гірничо-металургійний комплекс, сенсорні системи, ефективність, кіберфізичні системи, виробничі ризики, охорона праці.

Tsymbal Bohdan, Koifman Oleksiy. Research on the effectiveness of a drone for monitoring working conditions and technological safety at mining and metallurgical complex enterprises

The article investigates the effectiveness of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring working conditions and technogenic safety parameters at mining and metallurgical enterprises. The relevance of transitioning from traditional discrete control methods to continuous cyber-physical monitoring of the industrial environment is substantiated. A conceptual and analytical model of the monitoring system is proposed, in which the UAV is considered a mobile sensing agent capable of ensuring spatio-temporal continuity of data collection. A multi-criteria performance evaluation system is developed, including indicators of accuracy, responsiveness, spatial coverage, reliability, energy efficiency, and adaptability. It has been established that operational factors, including temperature, dust concentration, vibrations, and electromagnetic interference, have a nonlinear impact on the metrological characteristics of sensor systems, leading to increased measurement errors. It is demonstrated that the use of UAVs reduces data acquisition time by 1.5–2 times, provides a spatial coverage coefficient of up to 0.8–0.9, and increases the reliability of hazardous factor detection. At the same time, a trade-off between platform speed

and measurement accuracy is identified, which requires optimization of flight modes and the use of adaptive control algorithms. The economic efficiency of implementing UAV technologies is assessed, showing that it is formed both through the reduction of labor costs and measurement time, and through the decrease in industrial risks. The payback period of the system is estimated at 1.5–3 years. Recommendations for integrating UAVs into occupational safety management systems are developed based on the principles of multi-level integration, adaptive monitoring, and data-driven risk management.

Key words: unmanned aerial vehicles, working conditions monitoring, technogenic safety, mining and metallurgical complex, sensor systems, efficiency, cyber-physical systems, industrial risks, occupational safety.

Вступ. Сучасний етап розвитку гірничо-металургійного комплексу характеризується зростанням інтенсивності виробничих процесів, ускладненням технологічних систем та підвищенням рівня техногенного навантаження на виробниче середовище. За таких умов особливої актуальності набуває проблема забезпечення ефективного контролю параметрів умов праці та своєчасного виявлення небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на здоров'я працівників та рівень промислової безпеки.

Традиційні методи моніторингу, які базуються на стаціонарних вимірювальних приладах або періодичних інструментальних обстеженнях [1], характеризуються обмеженою мобільністю, недостатньою оперативністю отримання інформації та низькою адаптивністю до швидкоплинних змін виробничого середовища. Це знижує ефективність систем управління охороною праці та ускладнює процес прийняття своєчасних управлінських рішень у сфері техногенної безпеки.

У зв'язку з цим перспективним напрямом підвищення ефективності контролю є впровадження безпілотних літальних апаратів, здатних здійснювати дистанційний моніторинг у важкодоступних та небезпечних зонах. Оснащення дронів сучасними сенсорними системами дає можливість забезпечити безперервний збір даних щодо параметрів мікроклімату, концентрації шкідливих речовин, рівнів шуму та вібрацій із подальшою передачею та обробкою інформації в режимі реального часу.

Разом з тим, питання оцінки ефективності використання дронів у системах моніторингу умов праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу залишаються недостатньо дослідженими. Зокрема, потребують наукового обґрунтування критерії ефективності, точності вимірювань, надійності функціонування в умовах дії зовнішніх збурень, а також економічної доцільності їх впровадження.

Отже, дослідження ефективності застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу умов праці та параметрів техногенної безпеки є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню рівня безпеки праці, зниженню

виробничих ризиків та вдосконаленню систем управління охороною праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження полягає у комплексній оцінці ефективності використання безпілотного літального апарата для моніторингу умов праці та параметрів техногенної безпеки на підприємствах гірничо-металургійного комплексу, а також у науковому обґрунтуванні доцільності його впровадження в систему управління охороною праці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- здійснити аналіз сучасних методів та технічних засобів моніторингу умов праці та техногенної безпеки на промислових підприємствах;
- визначити критерії та показники ефективності функціонування дронів у виробничому середовищі;
- дослідити вплив експлуатаційних умов (температури, запиленості, наявності газових домішок, вібрацій) на точність та надійність роботи сенсорних систем;
- оцінити ефективність використання дрона з точки зору оперативності збору даних, просторового покриття та достовірності отриманої інформації;
- провести порівняльний аналіз традиційних та безпілотних методів моніторингу умов праці;
- дослідити параметри стабільності польоту та їх вплив на якість вимірювань;
- визначити економічну ефективність впровадження дронів у систему контролю умов праці;
- розробити рекомендації щодо інтеграції безпілотних технологій у систему управління охороною праці підприємств гірничо-металургійного комплексу.

Матеріали та методи дослідження. Об'єктом дослідження є процес моніторингу умов праці та параметрів техногенної безпеки на підприємствах гірничо-металургійного комплексу із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Даний процес розглядається як складна динамічна система, що функціонує в умовах впливу численних шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

Предметом дослідження виступають методи, моделі та технічні засоби підвищення ефективності контролю виробничого середовища на основі використання дронів, а також сукупність показників, що характеризують їх функціональну результативність, зокрема точність вимірювань, оперативність збору та передачі даних, а також надійність роботи в умовах підвищених техногенних навантажень.

Гіпотезою дослідження є припущення про те, що інтеграція безпілотних літальних апаратів, оснащених сучасними сенсорними модулями та інтелектуалізованими системами керування, дозволяє суттєво підвищити ефективність моніторингу умов праці порівняно з традиційними підходами за рахунок забезпечення безперервності спостереження, розширення просторового охоплення та підвищення достовірності отриманих даних, що, у свою чергу, сприяє зниженню рівня професійних та техногенних ризиків.

У процесі дослідження використано комплекс взаємопов'язаних методів. Зокрема, методи аналізу та синтезу застосовано для узагальнення сучасних наукових підходів до моніторингу умов праці та формування теоретичних засад дослідження. Системний підхід використано для розгляду процесу моніторингу як багаторівневої системи, що включає технічні, інформаційні та організаційні компоненти. Математичне моделювання дало змогу описати кінематичні та динамічні характеристики руху дрона, а також процеси стабілізації його польоту в умовах зовнішніх збурень.

Чисельне моделювання застосовано для дослідження ефективності алгоритмів керування та оцінки поведінки системи в змінних умовах виробничого середовища. Експериментальні методи використано для перевірки працездатності сенсорних модулів та визначення точності вимірювань у контрольованих умовах. Порівняльний аналіз дозволив оцінити переваги та обмеження використання дронів у порівнянні з традиційними методами моніторингу. Для обробки результатів дослідження застосовано методи математичної статистики, що забезпечило оцінювання достовірності отриманих даних та визначення похибок вимірювань.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики. Проблематика забезпечення безпечних умов праці та ефективного моніторингу виробничого середовища на підприємствах гірничо-металургійного комплексу знайшла широке відображення у працях вітчизняних та зарубіжних науковців. Зокрема, у дослідженнях [2–4] розглянуто вплив основних шкідливих виробничих факторів, таких як

запиленість повітря, підвищені температури, шум та вібрації, на функціональний стан організму працівників. У роботах [5; 6] обґрунтовано необхідність удосконалення систем контролю умов праці шляхом переходу до безперервного моніторингу виробничого середовища.

Традиційні підходи до контролю умов праці, що базуються на використанні стаціонарних або переносних вимірювальних засобів, детально проаналізовано у джерелах [7; 8]. Як зазначають автори, такі методи характеризуються обмеженим просторовим охопленням, значними часовими витратами та необхідністю перебування персоналу у потенційно небезпечних зонах. Це зумовлює підвищення виробничих ризиків та зниження ефективності систем управління охороною праці.

У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється використанню безпілотних літальних апаратів для вирішення завдань екологічного та промислового моніторингу. У роботах [9–11] висвітлено можливості застосування дронів для контролю якості повітря, виявлення витоків небезпечних речовин, а також обстеження технічного стану інфраструктурних об'єктів. Доведено, що використання безпілотних систем дозволяє підвищити оперативність збору інформації, розширити зону контролю та знизити вплив людського фактора на результати вимірювань.

Разом з тим, результати аналізу літературних джерел свідчать про недостатню розробленість питань комплексного застосування дронів для моніторингу саме умов праці у гірничо-металургійному виробництві. У працях [12; 13] лише частково розглядаються проблеми функціонування безпілотних апаратів в умовах підвищеної запиленості, високих температур та дії електромагнітних завад. Недостатньо дослідженими залишаються питання інтеграції мультисенсорних систем, забезпечення стабільності польоту та підвищення точності вимірювань у складних виробничих умовах.

Окремі дослідження [14; 15] присвячені розробленню алгоритмів керування безпілотними апаратами та організації передачі даних у режимі реального часу, однак їх адаптація до умов промислових підприємств потребує подальшого наукового обґрунтування. Також недостатньо висвітлено питання інтеграції результатів моніторингу у загальну систему управління охороною праці підприємства.

Подальший аналіз наукових джерел свідчить, що одним із ключових напрямів розвитку безпілотних систем є інтеграція мультисенсорних платформ, здатних одночасно фіксувати

декілька параметрів виробничого середовища. У роботах [16–18] розглянуто питання комбінування газоаналізаторів, термодатчиків, акустичних та вібраційних сенсорів у єдину інформаційно-вимірювальну систему. При цьому підкреслюється, що ефективність таких систем значною мірою залежить від алгоритмів обробки даних та їх калібрування в умовах перешкод та нестабільного середовища.

Важливим аспектом, який висвітлюється у сучасних дослідженнях [19; 20], є проблема забезпечення стабільності польоту дронів у складних виробничих умовах. Зокрема, наявність турбулентних потоків повітря, теплових градієнтів та обмеженого простору негативно впливає на точність позиціонування безпілотного апарата, що, у свою чергу, позначається на достовірності вимірювань. У зв'язку з цим значна увага приділяється розробленню адаптивних та робастних систем керування, здатних компенсувати вплив зовнішніх збурень.

Окрему групу досліджень [21–23] становлять роботи, присвячені інформаційно-комунікаційним аспектам функціонування дронів. У них розглядаються питання організації бездротових каналів передачі даних, використання технологій IoT та хмарних сервісів для обробки інформації. Встановлено, що застосування таких підходів дозволяє реалізувати концепцію інтелектуального моніторингу виробничого середовища з можливістю оперативного реагування на перевищення допустимих норм.

Крім того, у працях [24; 25] досліджуються економічні та організаційні аспекти впровадження безпілотних технологій у промисловість. Автори відзначають, що використання дронів сприяє зниженню витрат на проведення вимірювань, підвищенню продуктивності праці та зменшенню ризиків для персоналу. Водночас наголошується на необхідності врахування витрат на технічне обслуговування, підготовку персоналу та інтеграцію нових систем у вже існуючу інфраструктуру підприємства.

Разом із тим, незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, низка важливих питань залишається недостатньо вивченою. Зокрема, відсутні комплексні підходи до оцінювання ефективності застосування дронів у системах охорони праці, які б враховували технічні, метрологічні, економічні та організаційні показники. Також недостатньо розробленими є методи оцінки точності вимірювань у динамічних умовах та під впливом сукупності шкідливих факторів.

Таким чином, аналіз літературних джерел підтверджує наявність значного наукового доробку

у сфері моніторингу умов праці та застосування безпілотних технологій, однак виявляє потребу у проведенні комплексних досліджень, спрямованих на оцінку ефективності використання дронів у специфічних умовах гірничо-металургійного комплексу. Узагальнення результатів аналізу літературних джерел дозволяє зробити висновок про доцільність проведення подальших досліджень, спрямованих на розроблення комплексної методики оцінки ефективності використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу умов праці та техногенної безпеки. Це, у свою чергу, створює наукові передумови для підвищення рівня безпеки виробничих процесів та вдосконалення систем управління охороною праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Результати та дискусії. Рішення поставленого завдання реалізовано на основі поєднання системного, ієрархічного, структурно-функціонального та багатокритеріального підходів, що дозволило здійснити глибоку декомпозицію існуючих методів та технічних засобів моніторингу умов праці та техногенної безпеки з урахуванням специфіки гірничо-металургійного виробництва. У межах дослідження сформовано узагальнену концептуально-аналітичну модель системи моніторингу як багаторівневої кіберфізичної системи.

Формалізація процесу моніторингу здійснена через представлення виробничого середовища у вигляді просторово-часового поля параметрів $X(t, r)$, де $r \in \Omega$ – область контролю. Дискретна схема спостереження описується як:

$$X_d = \{X(t_i, r_j)\}, \quad (1)$$

де X_d – множина дискретних вимірювань; t_i – дискретні моменти часу; r_j – координати точок вимірювання.

Безперервна реконструкція поля визначається як:

$$\hat{X}(t, r) = I(X_d), \quad (2)$$

де $\hat{X}(t, r)$ – оцінене (відновлене) поле параметрів; I – оператор інтерполяції та фільтрації; X_d – дискретні дані вимірювань.

Для інтегральної оцінки ефективності системи введено функціонал:

$$E = \iint_{\Omega T} \Psi(A(t, r), O(t), S(r), R(t), \Phi(t, r)) dt dr, \quad (3)$$

де E – інтегральний показник ефективності; Ω – просторово-контрольована область; T – часовий інтервал спостереження; Ψ – узагальнена функція згортки критеріїв; $A(t, r)$ – точність вимірювань; $O(t)$ – оперативність отримання даних;

$S(r)$ – просторове покриття; $R(t)$ – надійність системи; $\Phi(t, r)$ – адаптивність системи до змін середовища; dt, dr – елементи інтегрування за часом і простором.

Аналіз інформаційної продуктивності системи базується на оцінці градієнтів інформаційного потоку:

$$\frac{\partial I}{\partial t} \uparrow, \nabla I(r) \uparrow, \quad (4)$$

де I – інформаційний потік; $\frac{\partial I}{\partial t}$ – швидкість зміни інформації в часі; $\nabla I(r)$ – просторовий градієнт інформації; r – координати у просторі.

Метрологічна похибка вимірювань описується залежністю:

$$\Delta = f(T, D, V, E_m, \tau) \quad (5)$$

де Δ – сумарна похибка вимірювання; T – температура середовища; D – концентрація пилу; V – рівень вібрацій; E_m – рівень електромагнітних завад; τ – час експлуатації або фактор деградації сенсора.

Зменшення невизначеності оцінюється через умовну ентропію:

$$H(X | \hat{x}) \downarrow, \quad (6)$$

де $H(X | \hat{x})$ – умовна ентропія (міра невизначеності реального стану X за наявності оцінки $\hat{x}$; X – реальний стан середовища; $\hat{x}$ – оцінений стан після обробки даних.

Адаптивність системи моніторингу може бути представлена як динамічна трансформація області контролю:

$$\Omega(t) \rightarrow \Omega^*(t), \quad (7)$$

де $\Omega(t)$ – початкова область моніторингу; $\Omega^*(t)$ – оптимізована область покриття у часі; t – час.

У межах дослідження сформовано багато-критеріальну систему оцінювання ефективності функціонування безпілотних літальних апаратів, яка базується на інтеграції технічних, метрологічних, експлуатаційних та інформаційних показників. До основних критеріїв віднесено: точність вимірювань (A), оперативність збору та передачі даних (O), просторове покриття (S), надійність функціонування (R), енергетичну ефективність (E_e) та адаптивність до змін середовища (Φ).

Інтегральний показник ефективності визначено у вигляді зваженої функції:

$$E_{drone} = \sum_{i=1}^n \omega_i K_i, \quad (8)$$

E_{drone} – узагальнений показник ефективності дрона; ω_i – вагові коефіцієнти критеріїв; K_i – нормовані значення окремих показників

ефективності; n – кількість критеріїв оцінювання.

Встановлено, що для умов гірничо-металургійного виробництва пріоритетними є показники оперативності та безпеки, що обумовлено необхідністю мінімізації перебування персоналу у небезпечних зонах.

Модельні дослідження показали, що експлуатаційні фактори мають нелінійний та взаємопов'язаний вплив на метрологічні характеристики сенсорних систем. Зокрема, встановлено, що температурні коливання спричиняють дрейф нульової лінії вимірювальних каналів, що призводить до систематичних похибок. Вплив запиленості проявляється у зниженні чутливості оптичних та газових сенсорів внаслідок осадження частинок на чутливих елементах.

Функціональна залежність похибки може бути представлена у вигляді:

$$\Delta = \alpha T + \beta D + \gamma G + \delta V + \epsilon, \quad (9)$$

де Δ – сумарна похибка вимірювання; T – температура; D – концентрація пилу; G – концентрація газових домішок; V – рівень вібрацій; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коефіцієнти чутливості сенсора до відповідних факторів; ϵ – випадкова складова похибки.

Встановлено, що найбільш критичним є комбінований вплив температури та запиленості, який може призводити до збільшення похибки на 20–35 %. Водночас застосування компенсаційних алгоритмів та систем калібрування дозволяє суттєво знизити цей вплив.

Оцінювання ефективності використання дрона проведено на основі аналізу трьох ключових показників: часу збору інформації, щільності просторового покриття та рівня достовірності даних. Встановлено, що використання безпілотного апарата дозволяє зменшити час збору даних у середньому у 1,5–2 рази порівняно з традиційними методами, що обумовлено високою мобільністю та можливістю одночасного охоплення декількох зон контролю.

Просторове покриття оцінюється через коефіцієнт:

$$S_c = \frac{S_{drone}}{S_{total}}, \quad (10)$$

де S_c – коефіцієнт покриття; S_{drone} – площа, охоплена моніторингом дрона; S_{total} – загальна площа контрольованої території.

Достовірність отриманої інформації визначається через ймовірність правильного виявлення небезпечного фактору:

$$P_d = 1 - P_f, \quad (11)$$

де P_d – ймовірність достовірного виявлення;
 P_f – ймовірність хибного спрацювання.

Результати дослідження показали, що при оптимальних умовах експлуатації значення S_c досягає 0,8–0,9, а P_d перевищує 0,9, що свідчить про високу ефективність застосування дронів для моніторингу умов праці. Разом з тим, у складних виробничих умовах спостерігається зниження цих показників, що потребує використання адаптивних алгоритмів керування та обробки даних.

У межах подальшого розвитку дослідження здійснено поглиблений порівняльний аналіз традиційних та безпілотних методів моніторингу умов праці на основі багатовимірної критеріальної моделі, що враховує як метрологічні, так і функціонально-експлуатаційні характеристики систем. Формалізація порівняння виконана шляхом введення узагальненого вектору ефективності системи моніторингу:

$$K = \{A, O, S, R, B, C\}, \quad (12)$$

де A – точність вимірювань; O – оперативність; S – просторове покриття; R – надійність; B – рівень безпеки; C – економічні витрати.

Для традиційних систем характерним є домінування показника точності (A) за рахунок стабільності вимірювальних умов та каліброваності стаціонарних приладів. Проте їх функціональна структура має виражену інерційність, що проявляється у низьких значеннях O та S . Це обумовлено дискретністю вимірювань, просторовою фіксованістю сенсорів та залежністю від людського фактору. У термінах інформаційної теорії це відповідає зниженій щільності інформаційного поля:

$$\rho_I^{rad} = \frac{N_m}{|\Omega| \cdot T} \downarrow, \quad (13)$$

де N_m – кількість вимірювань; $|\Omega|$ – площа контролю; T – часовий інтервал.

Натомість безпілотні системи характеризуються переходом до квазібезперервного режиму збору даних, що забезпечує зростання інформаційної насиченості середовища:

$$\rho_I^{drone} \gg \rho_I^{rad}, \quad (14)$$

Це досягається за рахунок мобільності платформи та можливості адаптивної зміни траєкторії руху відповідно до градієнтів контрольованих параметрів. Внаслідок цього формується ефект «інтелектуального зондування» середовища, коли густина вимірювань збільшується у зонах з високою варіабельністю параметрів.

Водночас встановлено, що підвищення просторово-часової роздільної здатності

супроводжується зростанням стохастичної складової похибки, що пов'язано з динамічністю платформи. Це формує компроміс між показниками A та O, S , який може бути описаний як задача багатокритеріальної оптимізації:

$$\max E(K) \text{ за умови } A \leq A_{min}. \quad (15)$$

Аналіз показав, що оптимальна область функціонування безпілотних систем досягається при балансуванні між швидкістю переміщення та стабільністю платформи, що забезпечує мінімізацію інтегральної похибки при збереженні високої продуктивності.

Подальше ускладнення дослідження пов'язане з аналізом параметрів стабільності польоту як стохастично детермінованого процесу. Рух безпілотного апарата розглянуто у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описують його просторову динаміку з урахуванням зовнішніх збурень:

$$J\dot{\omega} + \omega \times (J\omega) = M_c + M_d, \quad (16)$$

де J – тензор інерції; ω – вектор кутових швидкостей; M_c – керуючі моменти; M_d – моменти збурень.

Вплив нестабільності польоту на якість вимірювань доцільно розглядати через функцію передачі «рух – вимірювання», яка відображає трансформацію динамічних коливань у похибку сенсорної системи:

$$\Delta(t) = \int_0^t G(\tau) \cdot \xi(t - \tau) d\tau, \quad (17)$$

де $G(\tau)$ – імпульсна характеристика системи; $\xi(t)$ – процес збурень.

Установлено, що спектральні характеристики коливань платформи мають вирішальне значення для точності вимірювань. Зокрема, при збігу частот коливань із резонансними частотами сенсорних модулів спостерігається різке зростання похибки, що описується функцією підсилення:

$$|H(\omega)| \rightarrow \max \text{ при } \omega \approx \omega_0, \quad (18)$$

Це обумовлює необхідність синтезу систем керування з урахуванням частотної селективності, що дозволяє уникнути резонансних режимів.

Крім того, встановлено, що турбулентні потоки у виробничому середовищі формують випадкове поле швидкостей, яке може бути апроксимоване як стаціонарний гаусівський процес із кореляційною функцією:

$$R_v(\tau) = \sigma^2 e^{-\lambda \tau}, \quad (19)$$

де σ^2 – дисперсія турбулентності; λ – параметр затухання.

Цей фактор призводить до появи додаткових стохастичних коливань, що ускладнює задачу стабілізації та потребує використання робастних алгоритмів керування. Зокрема, ефективним є застосування адаптивних регуляторів із ідентифікацією параметрів середовища в реальному часі.

Окремо досліджено вплив кінематичних параметрів руху на достовірність вимірювань. Встановлено, що швидкість переміщення дрона визначає час інтеграції сенсорного сигналу, що безпосередньо впливає на співвідношення сигнал/шум:

$$\frac{S}{N} \sim \sqrt{t_{int}}, \quad (20)$$

де t_{int} – час інтеграції сигналу.

Збільшення швидкості руху призводить до зменшення t_{int} , що викликає зростання шумової складової. Таким чином, виникає ще один компроміс між продуктивністю моніторингу та точністю вимірювань.

Комплексний аналіз показав, що якість вимірювань у безпілотних системах визначається не лише характеристиками сенсорів, але й динамікою платформи, алгоритмами керування та параметрами середовища. Це підтверджує необхідність розгляду дрона як єдиної кіберфізичної системи, у якій процеси руху та вимірювання є взаємопов'язаними та взаємообумовленими.

Подальший розвиток дослідження пов'язаний із визначенням економічної ефективності впровадження безпілотних літальних апаратів у систему контролю умов праці, що розглядається як багатфакторна задача оптимізації витрат і результатів у межах функціонування кіберфізичної системи моніторингу. Економічний ефект у даному випадку формується не лише за рахунок прямого скорочення витрат на проведення вимірювань, але й через опосередковані складові, пов'язані зі зниженням виробничих ризиків, мінімізацією простоїв та підвищенням якості управлінських рішень.

Формалізація економічної ефективності здійснена шляхом введення інтегрального показника:

$$E_{econ} = \frac{B_{tot} - C_{tot}}{C_{tot}}, \quad (21)$$

де B_{tot} – сукупний економічний ефект (вигоди); C_{tot} – загальні витрати на впровадження та експлуатацію системи.

Структурно витрати можуть бути представлені як:

$$C_{tot} = C_{init} + C_{oper} + C_{maint} + C_{train}, \quad (22)$$

де C_{init} – початкові інвестиції (закупівля дронів, сенсорів, програмного забезпечення); C_{oper} – експлуатаційні витрати (енергія, логістика, обробка даних); C_{maint} – витрати на технічне обслуговування; C_{train} – витрати на підготовку персоналу.

Водночас сукупний ефект доцільно розглядати як суперпозицію декількох компонентів:

$$B_{tot} = B_{lab} + B_{risk} + B_{time} + B_{info}, \quad (23)$$

де B_{lab} – економія трудових ресурсів; B_{risk} – зниження витрат, пов'язаних із виробничим травматизмом та аваріями; B_{time} – ефект від скорочення часу виконання робіт; B_{info} – додатковий ефект від підвищення якості інформації та прийняття рішень.

У межах дослідження встановлено, що найбільш суттєвим є компонент B_{risk} , який формується через зменшення ймовірності настання аварійних ситуацій. Даний ефект може бути описаний як:

$$B_{risk} = \Delta P \cdot L, \quad (24)$$

де ΔP – зниження ймовірності настання небезпечної події; L – очікувані втрати у разі її реалізації.

Застосування дронів дозволяє зменшити ΔP за рахунок підвищення частоти та якості моніторингу, що особливо важливо для об'єктів із високим рівнем техногенного ризику. При цьому ефект має нелінійний характер, оскільки навіть незначне зниження ймовірності аварії може призводити до суттєвого економічного вигаду.

Ефект скорочення трудових витрат визначається через зміну продуктивності праці:

$$B_{lab} = (N_{trad} - N_{drone}) \cdot W \cdot T, \quad (25)$$

де N_{trad} – кількість персоналу, необхідного для виконання моніторингу традиційними та безпілотними методами відповідно; W – середня заробітна плата; T – часовий інтервал.

Аналіз показав, що використання дронів дозволяє скоротити потребу у залученні персоналу до виконання вимірювань у середньому на 30–50 %, що формує суттєвий економічний ефект у довгостроковій перспективі.

Окрему увагу приділено ефекту від підвищення якості інформації, який має опосередкований характер та проявляється через покращення управлінських рішень. Його доцільно інтерпретувати через зменшення ентропії системи управління:

$$\Delta H = H_{trad} - H_{drone} > 0, \quad (26)$$

що відповідає зниженню невизначеності щодо стану виробничого середовища. Це, у свою

чергу, призводить до оптимізації режимів роботи обладнання, своєчасного виявлення відхилень та запобігання критичним ситуаціям.

Динамічний аспект економічної ефективності оцінено із використанням дисконтованих показників:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t}, \quad (27)$$

де NPV – чистий приведений дохід; r – ставка дисконту; t – часовий період.

Розрахунки показали, що при типовому сценарії експлуатації строк окупності системи становить 1,5–3 роки залежно від масштабу підприємства та інтенсивності використання дронів. При цьому найбільш ефективним є їх застосування на об'єктах із високою просторовою розгалуженістю та підвищеним рівнем небезпеки.

Водночас встановлено, що економічна ефективність має чутливість до ряду параметрів, зокрема до вартості обладнання, інтенсивності експлуатації, рівня автоматизації обробки даних та частоти виникнення небезпечних ситуацій. Це обумовлює необхідність проведення сценарного аналізу:

$$E_{econ} = f(C_{init}, \lambda_{use}, P_{risk}, \eta_{auto}), \quad (28)$$

де λ_{use} – інтенсивність використання системи; P_{risk} – базовий рівень ризику; η_{auto} – ступінь автоматизації.

Розробка рекомендацій щодо інтеграції безпілотних технологій у систему управління охороною праці підприємств гірничо-металургійного комплексу доцільно розглядати як процес цілеспрямованої трансформації існуючої організаційно-технічної системи у бік формування адаптивної, даноорієнтованої та проактивної моделі управління виробничими ризиками. У цьому контексті безпілотні літальні апарати виступають не лише як інструмент збору даних, а як активний елемент кіберфізичної інфраструктури, що впливає на логіку функціонування всієї системи охорони праці.

Ключовою рекомендацією є реалізація принципу багаторівневої інтеграції, що передбачає узгоджене поєднання безпілотних систем із технологічними, інформаційними та управлінськими підсистемами підприємства. На операційному рівні це означає формування гібридної мережі моніторингу, в якій дрони виконують роль динамічних сенсорних вузлів, здатних оперативно змінювати конфігурацію контролю залежно від поточного стану виробничого середовища. Така мережа повинна функціонувати за принципом адаптивного перерозподілу ресурсів моніторингу, коли інтенсивність спостереження

автоматично підвищується у зонах із зростаючою невизначеністю або ризиком.

Інтеграція безпілотних технологій потребує переходу від дискретної до безперервно-аналітичної парадигми управління, у якій дані моніторингу не лише фіксують стан середовища, а й використовуються для прогнозування його змін. У зв'язку з цим доцільно впроваджувати аналітичні модулі, здатні ідентифікувати приховані закономірності, тренди та аномалії у потоках даних. Це забезпечує перехід до превентивного управління ризиками, коли рішення приймаються до моменту реалізації небезпечної події.

Особливого значення набуває організація інтелектуального планування місій дронів. На відміну від статичних маршрутів, доцільно використовувати динамічні сценарії польоту, що формуються з урахуванням багатofакторного аналізу: технологічних режимів роботи обладнання, історичних даних про інциденти, поточних показників середовища та прогнозних моделей. Такий підхід дозволяє реалізувати концепцію контекстно-орієнтованого моніторингу, у межах якого дрон виступає як автономний агент, здатний до часткової самостійної оптимізації своєї поведінки.

Інформаційна інтеграція повинна забезпечувати не лише акумуляцію даних, але й їх семантичну узгодженість. Це передбачає створення єдиного інформаційного простору, в якому дані з різних джерел (дрони, стаціонарні сенсори, виробничі системи) інтерпретуються у єдиному контексті. Доцільним є впровадження цифрових моделей виробничого середовища (цифрових двійників), які дозволяють відображати поточний стан об'єктів у режимі реального часу та здійснювати сценарне моделювання можливих відхилень.

Організаційно-управлінський аспект інтеграції передбачає перегляд ролі служби охорони праці, яка трансформується з контролюючого органу у центр аналітичної підтримки прийняття рішень. У цьому контексті необхідним є впровадження нових регламентів, що визначають порядок взаємодії між підрозділами, відповідальність за обробку та інтерпретацію даних, а також механізми оперативного реагування. Важливою є стандартизація процедур, що забезпечує відтворюваність та порівнюваність результатів моніторингу.

Підготовка персоналу повинна виходити за межі традиційного технічного навчання та включати формування компетентностей у сфері аналізу даних, системного мислення та управління ризиками. Оператор безпіотної системи має

розглядатися як елемент інтелектуальної системи, здатний взаємодіяти з алгоритмами та приймати рішення на основі комплексної інформації.

З технічної точки зору необхідно забезпечити узгодженість метрологічних характеристик усіх елементів системи. Це передбачає впровадження процедур динамічного калібрування, врахування впливу зовнішніх факторів на точність вимірювань та використання алгоритмів компенсації похибок. Важливим є також забезпечення стабільності платформи дрона, оскільки вона безпосередньо впливає на якість отриманих даних.

Підвищення надійності системи досягається за рахунок використання принципів розподіленості та резервування. Зокрема, доцільно формувати групи дронів, здатних виконувати колективні місії, що дозволяє зменшити залежність від окремих елементів системи та забезпечити безперервність моніторингу навіть у разі часткових відмов. Такий підхід відповідає концепції стійких до відмов кіберфізичних систем.

Окремим напрямом є забезпечення кіберфізичної безпеки, що включає захист каналів передачі даних, ідентифікацію та автентифікацію користувачів, а також запобігання несанкціонованому втручанню у роботу системи. З урахуванням зростаючої цифровізації виробництва ці аспекти набувають критичного значення.

Висновки. В результаті виконання дослідження здійснено системне узагальнення існуючих підходів до моніторингу умов праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу, що дозволило виявити їх структурно-функціональні обмеження, пов'язані з інерційністю процедур вимірювання, локальністю контролю та залежністю від участі персоналу у небезпечних зонах. Обґрунтовано доцільність переходу до кіберфізичної моделі моніторингу, в якій безпілотні літальні апарати виконують роль мобільних сенсорних агентів, здатних забезпечувати просторово-часову безперервність збору даних та підвищену інформаційну насиченість виробничого середовища.

Сформовано багатокритеріальну систему оцінювання ефективності функціонування дронів, яка інтегрує метрологічні, експлуатаційні, інформаційні та безпекові показники. Встановлено, що ключовими детермінантами ефективності виступають оперативність збору даних, просторове покриття та здатність системи адаптуватися до динамічних змін середовища, тоді як точність вимірювань набуває характеру обмежувального критерію, що визначає допустимі режими функціонування. Показано, що

ефективність безпілотних систем має нелінійний характер та формується внаслідок компромісу між швидкістю переміщення платформи, стабільністю польоту та параметрами сенсорної інтеграції.

Досліджено вплив експлуатаційних факторів виробничого середовища на метрологічні характеристики сенсорних систем, у результаті чого встановлено їх взаємопов'язаний та нелінійний характер дії. Виявлено, що найбільш критичним є комбінований вплив температурних коливань та запиленості, який спричиняє систематичні та стохастичні складові похибок, зумовлюючи деградацію чутливості вимірювальних каналів. Обґрунтовано необхідність застосування адаптивних алгоритмів компенсації та динамічного калібрування як засобів підтримання метрологічної стійкості системи в умовах змінних техногенних навантажень.

Оцінювання ефективності використання дронів показало їх суттєві переваги порівняно з традиційними методами моніторингу за показниками оперативності та просторового охоплення, що проявляється у зростанні щільності інформаційного поля та зменшенні невизначеності щодо стану виробничого середовища. Водночас встановлено наявність стохастичного зростання похибок, зумовленого динамікою руху платформи, що формує необхідність оптимізації режимів польоту з урахуванням обмежень за точністю вимірювань.

Порівняльний аналіз традиційних та безпілотних систем моніторингу дозволив встановити їх принципово різну інформаційну природу: якщо традиційні системи забезпечують високу точність у локальних точках контролю, то безпілотні платформи реалізують квазібезперервне зондування середовища з адаптивною зміною конфігурації спостереження. Це забезпечує перехід від статичної до динамічної моделі контролю, орієнтованої на виявлення просторово-часових градієнтів небезпечних факторів.

Дослідження параметрів стабільності польоту показало, що динаміка безпілотної платформи є критичним фактором, який визначає якість вимірювань через механізм трансформації коливань у похибку сенсорних систем. Встановлено залежність між спектральними характеристиками збурень та точністю вимірювань, що обґрунтовує необхідність синтезу робастних та адаптивних систем керування, здатних мінімізувати вплив турбулентних потоків, теплових градієнтів та обмеженого простору виробничого середовища.

Визначено, що економічна ефективність впровадження безпілотних технологій має

комплексний характер та формується як за рахунок прямих ефектів (зниження трудових витрат, скорочення часу виконання вимірювань), так і опосередкованих (зменшення ймовірності аварій, підвищення якості управлінських рішень, зниження невизначеності). Встановлено, що найбільш вагомим є ефект зниження виробничих ризиків, який має нелінійний характер та забезпечує значний економічний результат навіть при незначному зменшенні ймовірності небезпечних подій.

Розроблено концептуальні підходи до інтеграції безпілотних технологій у систему

управління охороною праці, що базуються на принципах багаторівневої інтеграції, адаптивного моніторингу та даноорієнтованого управління. Обґрунтовано необхідність формування єдиного інформаційного простору, впровадження аналітичних модулів прогнозування та переходу до проактивної моделі управління ризиками. Показано, що ефективна інтеграція дронів передбачає трансформацію організаційної структури системи охорони праці, розвиток компетентностей персоналу та забезпечення кіберфізичної безпеки функціонування системи

ЛІТЕРАТУРА:

1. Badri A., Boudreau-Trudel B., Souissi A. S. Occupational health and safety in the industry 4.0 era: a cause for major concern? *Safety science*. 2018. Vol. 109. P. 403–411. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012> (date of access: 19.03.2026).
2. Basner M. et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The lancet*. 2014. Vol. 383, № 9925. P. 1325–1332. URL: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(13\)61613-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(13)61613-x) (date of access: 19.03.2026).
3. Osman E., Pala K. Occupational exposure to wood dust and health effects on the respiratory system in a minor industrial estate in Bursa/Turkey. *International journal of occupational medicine and environmental health*. 2009. Vol. 22, № 1. URL: <https://doi.org/10.2478/v10001-009-0008-5> (date of access: 19.03.2026).
4. Parsons K. Human thermal environments. *Taylor & Francis Group*, 2015. 626 p. URL: <https://doi.org/10.1201/b16750> (date of access: 19.03.2026).
5. Lee J., Jin C., Bagheri B. Cyber physical systems for predictive production systems. *Production engineering*. 2017. Vol. 11, № 2. P. 155–165. URL: <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0729-4> (date of access: 19.03.2026).
6. Lee J. et al. Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 38. P. 3–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.026> (date of access: 19.04.2026).
7. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). На заміну ДСТУ OHSAS 18001:2010 ; чинний від 2021-01-01. Вид. офіц. ДСТУ OHSAS 18001:2010. URL: <https://surl.li/yoymn> (дата звернення: 19.03.2026).
8. NIOSH manual of analytical methods (2014-151) | NIOSH | CDC. Centers for Disease Control and Prevention | CDC. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/nmam/default.html> (date of access: 19.03.2026).
9. Sharma S. et al. UAV for surveillance and environmental monitoring. *Indian journal of science and technology*. 2016. Vol. 9, no. 43. URL: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i43/104396> (date of access: 19.03.2026).
10. Alvarado M. et al. Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites. *Sensors*. 2015. Vol. 15, № 8. P. 19667–19687. URL: <https://doi.org/10.3390/s150819667> (date of access: 19.03.2026).
11. Hu Z. et al. UAV aided aerial-ground iot for air quality sensing in smart city: architecture, technologies, and implementation. *IEEE network*. 2019. Vol. 33, no. 2. P. 14–22. URL: <https://doi.org/10.1109/mnet.2019.1800214> (date of access: 19.03.2026).
12. Vanegas F., Gonzalez F. Enabling UAV navigation with sensor and environmental uncertainty in cluttered and gps-denied environments. *Sensors*. 2016. Vol. 16, № 5. P. 666. URL: <https://doi.org/10.3390/s16050666> (date of access: 19.03.2026).
13. Sung Y., Dixit D., Tokekar P. Environmental hotspot identification in limited time with a UAV equipped with a downward-facing camera. 2021 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), Xi'an, China, 30 May – 5 June 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/icra48506.2021.9561185> (date of access: 19.03.2026).
14. Rohi G., Ejofodomi O., Ofualagba G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon*. 2020. Vol. 6, № 1. P. e03252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03252> (date of access: 19.03.2026).

15. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE communications surveys & tutorials*. 2016. Vol. 18, № 2. P. 1123–1152. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2495297> (date of access: 19.03.2026).
16. Akyildiz I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*. 2002. Vol. 38, № 4. P. 393–422. URL: [https://doi.org/10.1016/s1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/s1389-1286(01)00302-4) (date of access: 19.03.2026).
17. Reddy Basani D. K. et al. Sensor fusion techniques for drones in iot-based surveillance systems. *International journal of multidisciplinary research and explorer*. 2022. Vol. 2, № 5. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.70454/ijmre.2022.20501> (date of access: 19.03.2026).
18. Забезпечення надійності та безпеки у сучасних безпроводових сенсорних мережах на основі впровадження метрики RSSI / П. Опенько та ін. Повітряна міць України. 2024. Т. 1, № 6. С. 131–136. URL: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-131-136> (дата звернення: 19.03.2026).
19. Bouabdallah S., Siegwart R. Full control of a quadrotor. 2007 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, San Diego, CA, USA, 29 October – 2 November 2007. 2007. URL: <https://doi.org/10.1109/iroso.2007.4399042> (date of access: 19.03.2026).
20. Hoffmann G. et al. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: theory and experiment. AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit, Hilton Head, South Carolina. Reston, Virginia, 2007. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461> (date of access: 19.03.2026).
21. Atzori L., Iera A., Morabito G. The internet of things: a survey. *Computer networks*. 2010. Vol. 54, № 15. P. 2787–2805. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010> (date of access: 19.04.2026).
22. Gubbi J. et al. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*. 2013. Vol. 29, № 7. P. 1645–1660. URL: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010> (date of access: 19.04.2026).
23. Al-Fuqaha A. et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE communications surveys tutorials*. 2015. Vol. 17, № 4. P. 2347–2376. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2444095> (date of access: 19.04.2026).
24. Real-time big data analytical architecture for remote sensing application. *International journal of advance engineering and research development*. 2016. Vol. 3, no. 12. URL: <https://doi.org/10.21090/ijaerd.79669> (date of access: 19.04.2026).
25. Hossein Motlagh N., Taleb T., Arouk O. Low-Altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: comprehensive survey and future perspectives. *IEEE internet of things journal*. 2016. Vol. 3, no. 6. P. 899–922. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2016.2612119> (date of access: 19.04.2026).

REFERENCES:

1. Badri, A., Boudreau-Trudel, B., Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>
2. Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325–1332. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(13\)61613-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(13)61613-x)
3. Osman, E., & Pala, K. (2009). Occupational exposure to wood dust and health effects on the respiratory system in a minor industrial estate in Bursa/Turkey. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 22(1). <https://doi.org/10.2478/v10001-009-0008-5>
4. Parsons, K. (2015). Human thermal environments. *Taylor & Francis Group*. <https://doi.org/10.1201/b16750>
5. Lee, J., Jin, C., Bagheri, B. (2017). Cyber physical systems for predictive production systems. *Production Engineering*, 11(2), 155–165. <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0729-4>
6. Lee, J., Ardakani, H. D., Yang, S., & Bagheri, B. (2015). Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *Procedia CIRP*, 38, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.026>
7. DP «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti». Systemy upravlinnia okhoronoiu zdorovia ta bezpekoiu pratsi. Vymohy ta nastanovy shchodo zastosuvannia (ISO 45001:2018, IDT) (DSTU ISO 45001:2019). DSTU OHSAS 18001:2010. <https://surl.li/yoptmn>
8. NIOSH manual of analytical methods (2014-151) | NIOSH | CDC. (б. д.). Centers for Disease Control and Prevention | CDC. <https://www.cdc.gov/niosh/nmam/default.html>
9. Sharma, S., Muley, A., Singh, R., & Gehlot, A. (2016). UAV for surveillance and environmental monitoring. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(43). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i43/104396>

10. Alvarado, M., Gonzalez, F., Fletcher, A., & Doshi, A. (2015). Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites. *Sensors*, 15(8), 19667–19687. <https://doi.org/10.3390/s150819667>
11. Hu, Z., Bai, Z., Yang, Y., Zheng, Z., Bian, K., & Song, L. (2019). UAV aided aerial-ground iot for air quality sensing in smart city: Architecture, technologies, and implementation. *IEEE Network*, 33(2), 14–22. <https://doi.org/10.1109/mnet.2019.1800214>
12. Vanegas, F., Gonzalez, F. (2016). Enabling UAV navigation with sensor and environmental uncertainty in cluttered and gps-denied environments. *Sensors*, 16(5), 666. <https://doi.org/10.3390/s16050666>
13. Sung, Y., Dixit, D., & Tokekar, P. (2021). Environmental hotspot identification in limited time with a UAV equipped with a downward-facing camera. У 2021 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icra48506.2021.9561185>
14. Rohi, G., Ejofodomi, O., & Ofualagba, G. (2020). Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon*, 6(1), Стаття e03252. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03252>
15. Gupta, L., Jain, R., & Vaszkun, G. (2016). Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1123–1152. <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2495297>
16. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422. [https://doi.org/10.1016/s1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/s1389-1286(01)00302-4)
17. Reddy Basani, D. K., Ramanjaneyulu Gudivaka, B., Gudivaka, R. K., Gudivaka, R. L., Grandhi, S. H., Kurunthachalam, A. (2022). Sensor fusion techniques for drones in iot-based surveillance systems. *International Journal of Multidisciplinary Research and Explorer*, 2(5), 1–12. <https://doi.org/10.70454/ijmre.2022.20501>
18. Openko, P., Dovzhenko, N., Orikhovskiy, P., Ikaiev, D. (2024). Zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky u suchasnykh bezprovodovykh sensorykh merezhakh na osnovi vprovadzhennia metryky RSSI. *Povitriana mits Ukrainy*, 1(6), 131–136. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-131-136>
19. Bouabdallah, S., Siegwart, R. (2007). Full control of a quadrotor. 2007 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iros.2007.4399042>
20. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., Tomlin, C. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. У AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461>
21. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
22. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
23. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2444095>
24. Real-time big data analytical architecture for remote sensing application. (2016b). *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 3(12). <https://doi.org/10.21090/ijaerd.79669>
25. Hossein Motlagh, N., Taleb, T., Arouk, O. (2016). Low-Altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: Comprehensive survey and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6), 899–922. <https://doi.org/10.1109/jiot.2016.2612119>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ГІРНИЦТВО

УДК 622.271

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-24>

АДАПТИВНА МОДЕЛЬ КЛАСИФІКАЦІЇ ГІРНИЧОЇ МАСИ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ РЕЖИМУ ГІРНИЧИХ РОБІТ СИСТЕМИ «КАР'ЄР-ТЕХНОГЕННЕ РОДОВИЩЕ»

Григор'єв Юліан Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри відкритих гірничих робіт
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-1780-5759

Григор'єв Ігор Євгенійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0006-2787-106X

Лебеденко Володимир Володимирович,

аспірант
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0009-0006-4185-4098

Робота присвячена дослідженню впливу ціни на режим гірничих робіт у системі «кар'єр – техногенне родовище». Актуальність роботи зумовлена тим, що традиційний бінарний поділ гірничої маси на руду та розкрив не забезпечує об'єктивного врахування проміжних категорій сировини в умовах мінливої техніко-економічної кон'юнктури. У роботі техногенну сировину розглянуто як окремий функціональний клас між рудою та розкривом, а бортовий вміст – як динамічний економічний параметр, чутливий до зміни ціни. Методично дослідження ґрунтується на побудові блочної економічної моделі, інтерпретації межі економічної беззбитковості блока як економічного аналога бортового вмісту, визначенні кінцевого контуру кар'єру за допомогою методів графової оптимізації та подальшій трикомпонентній класифікації блоків за критеріями мінімального промислового вмісту й поточної цінності блоку. Для оцінки впливу цінових сценаріїв на режим гірничих робіт використано кумулятивні графіки, побудовані для базового сценарію та сценаріїв покращення цінової кон'юнктури. Встановлено, що зміна ціни призводить до перегрупування блоків між класами «руда – техногенна сировина – розкрив», змінює структуру рудопотоку, знижує випереджальне розкривне навантаження та впливає на режим відпрацювання. Обґрунтовано, що техногенна сировина може розглядатися як керований резерв адаптації виробничої системи до ринкових коливань, а інтеграція її в модель відкритої розробки створює передумови для підвищення ефективності використання мінерально-сировинної бази та вдосконалення довгострокового проектування.

Ключові слова: бортовий вміст, блочна модель, техногенне родовище, техногенна сировина, кінцевий контур кар'єру, режим гірничих робіт, відкриті гірничі роботи.

Hryhoriev Yulian, Hryhoriev Ihor, Lebedenko Volodymyr. An Adaptive Model of Geomaterial Classification for Strategic Mine Design within the "Open-Pit – Technogenic Deposit" Framework

This research investigates the impact of pricing dynamics on the mining sequence within an integrated "open-pit – technogenic deposit" system. The relevance of the study stems from the limitations of the traditional binary classification of geomaterials into ore and waste, which fails to provide an objective assessment of intermediate raw material categories under volatile technical and economic conditions. In this study, technogenic materia is treated as a distinct functional class situated between ore and waste, while the cut-off grade is defined as a dynamic economic parameter sensitive to price fluctuations.

Methodologically, the research is based on the construction of an economic block model, interpreting the economic break-even point of a block as an analogue for the cut-off grade. The ultimate pit limit is determined through graph optimization methods, followed by a three-component block classification based on the criteria of minimum industrial grade and current block value. To assess the impact of pricing scenarios on the mining sequence, cumulative curves were constructed for both the base case and improved market condition scenarios.

The findings indicate that price fluctuations trigger a reclassification of blocks among the "ore – technogenic material – waste" categories, alter the structure of the raw material flow, reduce the pre-stripping load, and modify the overall mining regime. The study substantiates that technogenic material serves as a manageable reserve for adapting production systems to market fluctuations. Integrating this approach into open-pit mining models provides a robust framework for enhancing the efficiency of the mineral resource base and refining the engineering design of open-pit mining operations.

Key words: cut-off grade, block value, technogenic deposit, technogenic raw material, ultimate pit limit, mining regime, open-pit mining.

Вступ. Ефективне управління мінерально-сировинною базою глибоких залізрудних кар'єрів дедалі більше визначається поєднаним впливом гірничо-геологічних, технологічних та економічних чинників. Із поглибленням гірничих робіт зростають коефіцієнт розкриття, енергоємність транспортування гірничої маси та складність геометрії робочої зони, тоді як середній вміст корисного компоненту в руді знижується. За таких умов економічна межа доцільності вилучення окремих блоків перестає бути статичною характеристикою та залежить від динаміки цін, рівня технологічного вилучення, структури витрат і режиму гірничих робіт. Отже, бортовий вміст доцільно розглядати, як динамічний інструмент адаптивного управління ресурсною базою кар'єру [1; 2; 3].

Традиційні підходи до проектування відкритих гірничих робіт ґрунтуються на жорсткому бінарному поділі гірничої маси на руду та розкрит. Однак для родовищ складної геологічної будови в умовах цінової мінливості такий підхід є недостатнім, оскільки він не враховує проміжних категорій сировини [4; 5], яка на момент відпрацювання не відповідає критеріям економічної доцільності, але за сприятливих умов здатна набувати виробничої цінності. За такої постановки техногенне родовище має розглядатися як інтегрований елемент єдиної системи «кар'єр – техногенне родовище», структура якої формується безпосередньо на етапі довгострокового проектування гірничих робіт.

Ключовим теоретичним аспектом цієї постановки є взаємозв'язок між бортовим вмістом, економічною цінністю блока та співвідношенням класів гірничої маси в межах кінцевого контуру кар'єру. У межах блочної моделі межа доцільності відпрацювання може бути виражена через показник цінності блока BV , що характеризує різницю між очікуваним доходом від вилучення корисного компоненту та сукупними витратами на видобуток, транспортування та переробку. За такого підходу умова $BV = 0$ визначає межу економічної рівноваги і може розглядатися як економічний аналог бортового вмісту [1; 2]. Поєднання критеріїв економічної цінності блоку та мінімально промислового вмісту дає змогу виокремити техногенну сировину як окремий

функціональний клас [3; 4] між рудою та розкритом, а отже, дослідити внутрішню економічну структуру кар'єрного простору.

У межах даного дослідження кінцеві контури кар'єру приймаються умовно сталими. Виходячи з цього, метою роботи є виявлення впливу ціни на режим гірничих робіт у системі «кар'єр – техногенне родовище». Для досягнення поставленої мети визначено кінцевий контур кар'єру в межах блочної моделі [6; 7], обґрунтовано використання умови $BV=0$ як економічного аналога бортового вмісту, виконано класифікацію блоків за критеріями мінімального промислового вмісту та цінності блоку з виділенням класу техногенної сировинної, а також досліджено зміну режимів гірничих робіт для різних цінових сценаріїв.

Методи та методики дослідження. Методологія дослідження ґрунтується на послідовному переході від просторово-економічної формалізації блочної моделі до сценарного аналізу режимів гірничих робіт у межах умовно сталого контуру кар'єру. Така логіка зумовлена тим, що в запропонованій концепції техногенне родовище не є заданим самостійним об'єктом. Воно виступає похідним результатом комплексу рішень щодо економічної оцінки блоків, оконтурення, класифікації гірничої маси та порядку її залучення до виробничого циклу. З огляду на це, методичний апарат спрямовано на розкриття внутрішніх механізмів перерозподілу матеріалу між функціональними класами «руда – техногенна сировина – розкрит» та аналіз адаптації режиму гірничих робіт до мінливого техніко-економічного середовища.

На першому етапі дослідження було сформовано блочну модель родовища, у межах якої кожна виймальна одиниця розглядалася як елементарний носій просторової, якісної та вартісної інформації. Для кожного блока визначено вміст корисного компоненту, його належність до потенційно мінералізованої або немінералізованої частини масиву, а також показник цінності блоку, що відображає очікуваний результат відпрацювання цього блока за поточних техніко-економічних умов. У такій постановці економічна цінність блока задається як різниця між очікуваним доходом від реалізації вилученого

корисного компоненту та сукупними витратами на видобуток, транспортування та переробку.

На другому етапі визначено кінцевий контур кар'єру як економічно оптимальну множину блоків з урахуванням просторово-геометричних обмежень відкритої розробки. Для цього застосовано графову постановку задачі топологічної оптимізації, пов'язану з класичним підходом Лерча – Гросмана [7; 8]. У межах цієї постановки блоки подано вершинами орієнтованого графа з вагами, що відповідають їхній економічній цінності, тоді як просторові залежності задаються дугами передування. Унаслідок цього задача зводиться до пошуку замкненої множини блоків, яка одночасно максимізує сумарну економічну цінність і не порушує обмежень щодо просторової допустимості гірничих робіт.

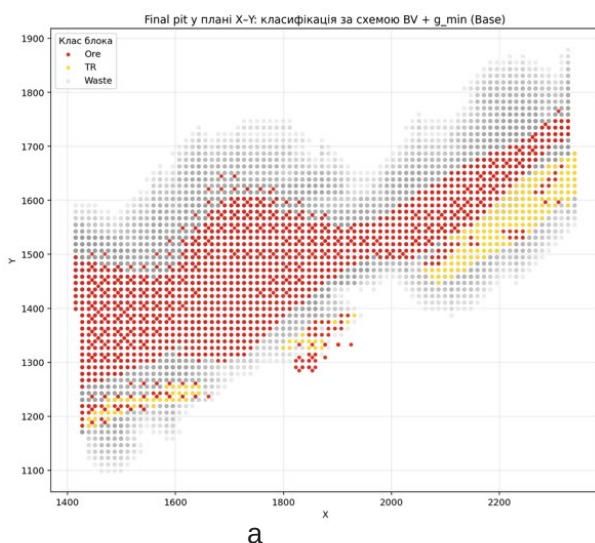
Після визначення кінцевого контуру здійснено класифікацію блоків за двома критеріями: мінімально промисловим вмістом та цінністю блоку [1; 2]. За цією схемою руда ідентифікується умовою $BV > 0$, техногенна сировина – умовами $g \geq g_{main}$ та $BV \leq 0$, а розкрив – умовою $g < g_{main}$. Такий підхід дозволив виділити техногенну сировину як окремий функціональний клас [3; 5] між рудою та розкривом і розглядати її як ресурсну основу техногенного родовища. Як представлено на рис. 1, блочна модель досліджуваного техногенного родовища для сценарію «Базовий» дозволяє візуалізувати структуру блоків за класами «руда», «техногенна сировина» та «розкрив» відповідно до встановлених критеріїв беззбитковості.

На завершальному етапі виконано сценарне моделювання для базового цінового сценарію та сценаріїв покращення кон'юнктури цін

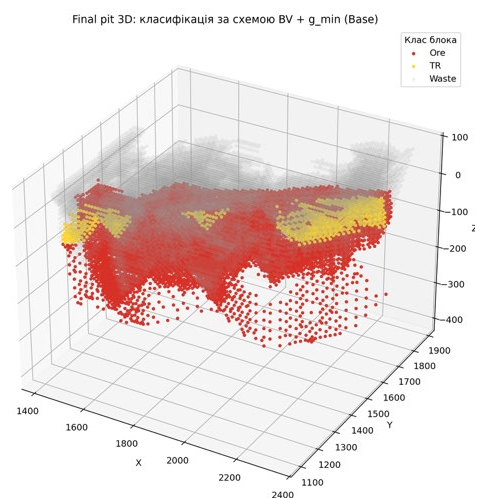
(+10%, +20%, +30% [10; 11]. Для аналізу режиму гірничих робіт розглянуто два крайні сценарії відпрацювання – режим пошарового виймання (γ_0) та режим виймання крутопохилими шарами (γ_{max}). У цій роботі параметр γ використовується як сценарний параметр операційної геометрії фронту відпрацювання і не інтерпретується як нормативний кут стійкого укосу борту. Основним інструментом порівняння сценаріїв слугував аналіз кумулятивних графіків [9; 10], що відображають динаміку співвідношення між рудою, техногенною сировиною, розкривом і сумарною гірничою масою в межах кінцевого контуру.

Результати та дискусії. Отримані результати показали, що за фіксованого кінцевого контуру зміна техніко-економічних умов спричиняє системну зміну внутрішньої економічної структури кар'єрного простору. Передусім підтверджено доцільність використання умови $BV=0$ як вартісного аналога бортового вмісту [1; 2], оскільки саме вона відокремлює рентабельні блоки від тих, відпрацювання яких за поточних умов не забезпечує компенсації витрат. Це означає, що межа кондиційності в рамках запропонованої моделі визначається поточним економічним станом системи.

Застосування критеріїв мінімального промислового вмісту g_{min} та економічної цінності блоку BV дозволило виокремити проміжний клас техногенної сировини, який у традиційній бінарній схемі «руда – розкрив» фактично залишається неідентифікованим. Показано, що цей клас формує ресурсну основу техногенного родовища в межах системи «кар'єр – техногенне родовище». Саме завдяки цьому техногенна сировина набуває статусу окремого



а



б

Рис. 1. Блочна модель досліджуваного геогенного родовища із класифікацією блоків за сценарієм «Базовий» (середовище Spyder 6, Python): а) вид зверху; б) ізометрія

функціонального об'єкта управління [4; 5], здатного змінювати своє цільове призначення залежно від рівня цін. На рис. 2 проілюстровано блочну модель за умови зростання ціни на 20 %, де чітко простежується розширення зони економічно цінних блоків за рахунок перекласифікації частини класу «розкрит» у клас «техногенна сировина» та частини класу «техногенна сировина» у клас «руда».

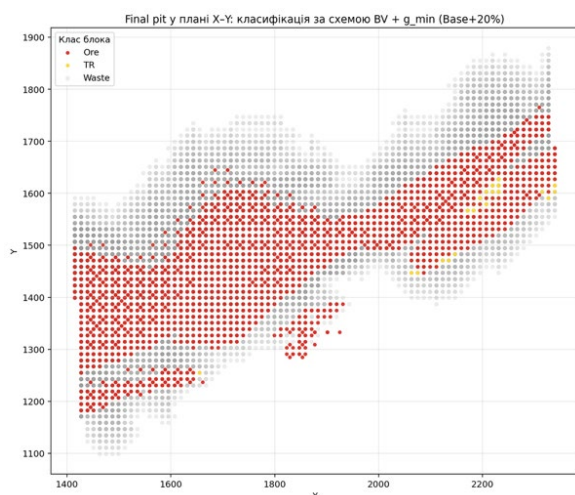
Подальший аналіз спрямований на встановлення того, яким чином ціна впливає на режим гірничих робіт та визначає динаміку залучення ресурсної бази до відпрацювання. Для цього в межах кінцевого контуру зіставлено два граничні режими доступу до блоків, описані параметром γ – кут укосу робочого борту кар'єра: режим пошарового виймання (γ_0) та режим виймання крутопохилими шарами (γ_{max}). Уже на рівні загальної форми кумулятивних кривих встановлено, що між сценаріями існують не лише кількісні, а й структурні відмінності.

Порівняння кумулятивних графіків для базового сценарію засвідчило, що навіть без зміни ринкових умов перехід до трикомпонентної класифікації впливає на режим гірничих робіт. Завдяки врахуванню техногенної сировини система забезпечує формування більшого обсягу корисної маси без пропорційного зростання розкривного навантаження. При відповідних економічних умовах господарювання цей ефект масштабується: техногенна сировина активніше залучається до рудопотоку, функціонально придатна частина ресурсної бази розширюється, а блоки з вищою економічною цінністю залучаються до відпрацювання раніше. У технологічному плані виокремлена сировина

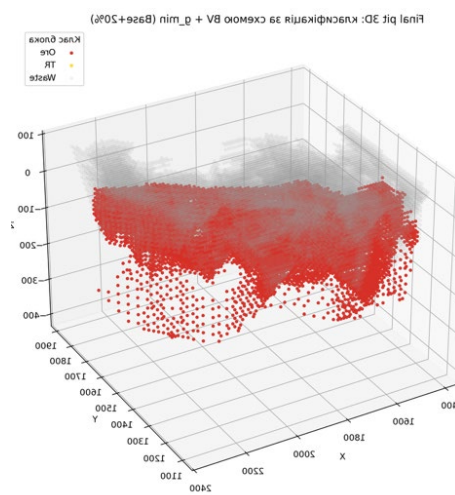
являє собою низькокондиційно мінералізовану масу, яка за традиційного підходу класифікується як розкрит та спрямовується у відвали. Проте за сприятливих економічних умов, коли її поточна цінність долає межу беззбитковості, вона змінює своє функціональне призначення і перенаправляється до складу шихтування або безпосередньо в переробний цикл.

Для візуалізації змін ресурсної бази під впливом ціни було проведено порівняльний аналіз кумулятивних залежностей. На рис. 3 наведено результати моделювання для «Базового» сценарію та прогнозованого сценарію зі зростанням ціни на 20%, що дозволяє оцінити динаміку залучення техногенної сировини при зміні кутів робочого борту кар'єру.

Особливо показовим виявився аналіз сімейства кумулятивних графіків для сценарних кроків +10%, +20% і +30% ціни [10; 11]. Він продемонстрував, що кожен етап зростання ціни системно зміщує кумулятивну динаміку відпрацювання, формуючи інтенсивніший і збалансованіший рудопотік у межах незмінного кінцевого контуру. Це підтверджує, що вплив ціни реалізується через внутрішню перекласифікацію блоків і адаптацію режиму освоєння ресурсної бази. Водночас характерна «східчастість» кумулятивних кривих, особливо для режиму пошарового виймання (γ_0), підтверджує, що цей ефект є не алгоритмічною похибкою, а об'єктивним відображенням дискретної структури 3D-моделі та просторової логіки графа передуваль. Як ілюструє рис. 4, сімейство кумулятивних графіків для кроків ціни +10%, +20% та +30% демонструє тенденцію до зміщення траєкторії відпрацювання та збільшення потужності рудопотоку.



а



б

Рис. 2. Блочна модель досліджуваного геогенного родовища із класифікацією блоків за сценарієм «Базовий +20%» (середовище Spyder 6, Python): а) вид зверху; б) ізометрія

Узагальнюючи сказане, отримані результати підтверджують, що істотна зміна внутрішньої економічної структури відпрацювання може відбуватися з умовно сталими межами кінцевого контуру. Це має важливе теоретичне і практичне значення. У теоретичному плані запропонований підхід розширює уявлення про бортовий вміст як про динамічний економічний критерій, а також виокремлює техногенну сировину як окремий функціональний клас. У практичному аспекті він відкриває можливість адаптивного планування гірничих робіт через внутрішню економічну переоцінку блоків, а не лише через

повторне оконтурення кар'єру. Разом із тим подальший розвиток моделі потребує розширеної кількісної оцінки результатів, зокрема через інтеграцію індикаторів перекласифікації блоків, коефіцієнтів розкриття, середнього вмісту у рудопотоці та прямого зв'язку з інтегральним показником чистого дискontованого доходу [9; 10].

Висновки. У статті обґрунтовано доцільність переходу від традиційної статичної моделі відкритої розробки до системного адаптивного підходу, у межах якого кар'єр і техногенне родовище розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної виробничо-економічної системи.

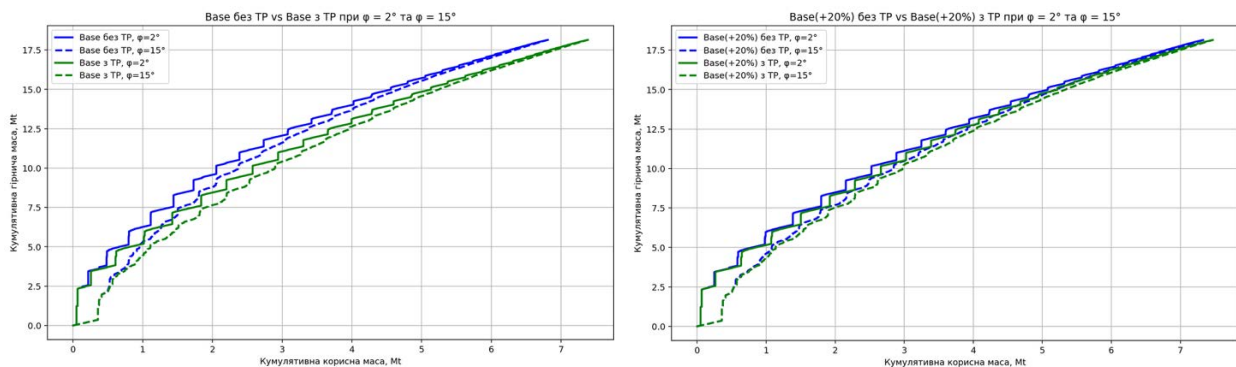


Рис. 3. Порівняльний аналіз кумулятивних залежностей видобутку гірничої маси для цінових сценаріїв «Базовий» та «Базовий+20%» для двох крайніх випадків режимів гірничих робіт ($\gamma=2^\circ$ та $\gamma=15^\circ$)

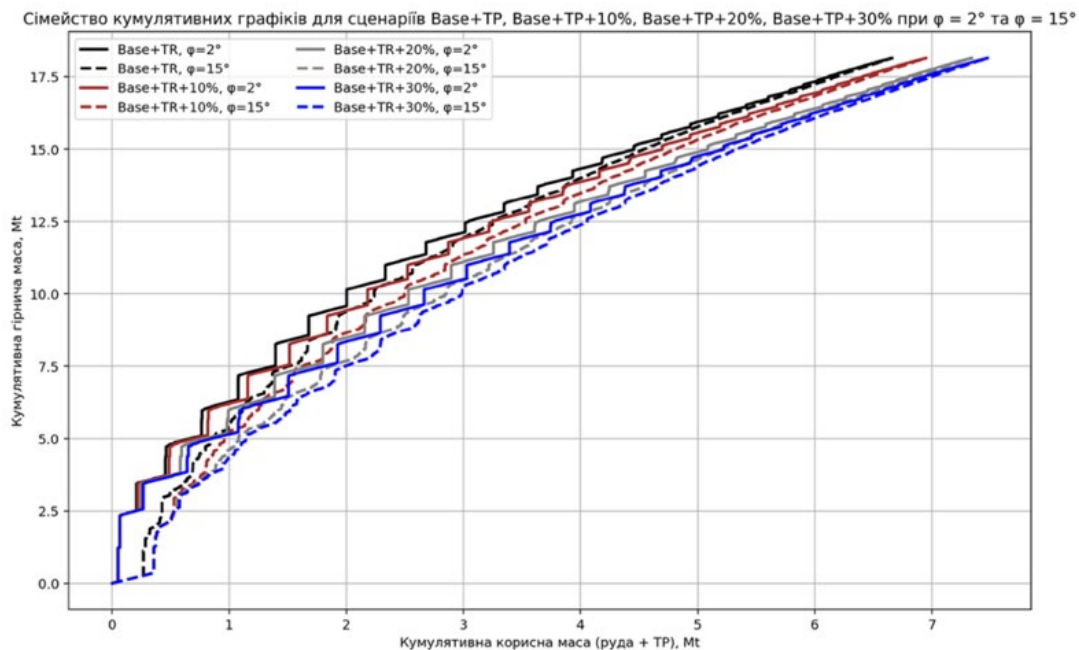


Рис. 4. Сімейство кумулятивних залежностей видобутку руди для різних сценаріїв ціни від «Базовий» до «Базовий+30%» та режимів гірничих робіт ($\gamma=2^\circ$ та $\gamma=15^\circ$)

Доведено, що техногенна сировина не є пасивним наслідком видобутку, а формується як похідний результат рішень щодо оконтурення, економічної оцінки блоків та режиму гірничих робіт. Такий підхід дозволяє перейти від ретроспективного аналізу накопичених техногенних масивів до їх інтерпретації як керованого резерву на етапі довгострокового проєктування.

Встановлено, що в умовах блочно-вартісної моделі умова $BV=0$ є дієвим економічним аналогом бортового вмісту, оскільки визначає межу беззбитковості блока за поточних техніко-економічних параметрів. Це дає змогу трактувати бортовий вміст як динамічний економічний параметр, чутливий до зміни цінових умов, а поєднання критеріїв мінімально промислового вмісту та цінності блоку – як основу для точнішого відображення внутрішньої структури кар'єрного простору. На цій основі виокремлено проміжний функціональний клас – техногенну сировину, що займає положення між рудою та розкритом і формує ресурсну основу техногенного родовища.

Результати сценарного моделювання підтвердили, що за умовно сталого кінцевого контуру покращення техніко-економічних умов змінює внутрішню економічну структуру кар'єрного простору, спричиняє перегрупування блоків між

класами «руда – техногенна сировина – розкрит» та впливає на режим гірничих робіт. Аналіз кумулятивних залежностей засвідчив, що сприятливіші цінові умови забезпечують ефективніше формування рудопотоку, зменшення випереджального розкриття та скороченню термінів розкриття промислово кондиційних горизонтів. Це підтверджує, що техногенна сировина за відповідних умов виступає елементом адаптації та збільшення потужності рудопотоку в системі «кар'єр – техногенне родовище».

Практичне значення запропонованого підходу полягає у створенні методичної основи для довгострокового проєктування відкритих гірничих робіт яке дозволяє підтримувати економічну життєздатність проєктного контуру шляхом зміни режиму гірничих робіт та перекласифікацію класів сировини в умовах мінливої ринкової кон'юнктури. Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розширенням кількісної оцінки отриманих результатів, інтеграцією алгоритмів календарного планування, динамічної моделі шихтування, урахуванням обмежень переробної ланки та прямого розрахунку додаткового економічного ефекту за критерієм чистого дисконтованого доходу для альтернативних сценаріїв залучення техногенної сировини.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Lane K. F. The Economic Definition of Ore: Cut-off Grades in Theory and Practice. *London : Mining Journal Books*, 1988. 149 p.
2. Ahmadi M. R. Cutoff grade optimization based on maximizing net present value using a computer model. *Journal of Sustainable Mining*. 2018. Vol. 17, No. 2. P. 68–75. DOI: 10.1016/j.jsm.2018.04.002.
3. Григор'єв Ю. І., Пилипчук Д. І., Лебеденко В. В., Луценко С. О., Перегудов Ю. В. Адаптивне управління параметрами комплексної механізації відкритих гірничих робіт за зміни бортового вмісту корисного компонента. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 4. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-4-40.
4. Григор'єв Ю. І. Підвищення ефективності проектних рішень щодо пошуку оптимального режиму гірничих робіт при сумісному комплексному відпрацюванні техногенних і геогенних родовищ. *Качество минерального сырья : збірник наукових праць / матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Кривий Ріг*, 2014.
5. Григор'єв Ю. І., Григор'єв І. Є. Дослідження режиму гірничих робіт з урахуванням сумісного відпрацювання геогенного й техногенних родовищ // *Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів : матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Житомир : ЖДТУ*, 2016.
6. Lerchs H., Grossmann I. F. Optimum design of open-pit mines. *Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy*. 1965. Vol. 58. P. 47–54.
7. Picard J.-C. Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems. *Management Science*. 1976. Vol. 22, No. 11. P. 1268–1272. DOI: 10.1287/mnsc.22.11.1268.
8. Hochbaum D. S. The pseudoflow algorithm: A new algorithm for the maximum-flow problem. *Operations Research*. 2008. Vol. 56, No. 4. P. 992–1009. DOI: 10.1287/opre.1080.0524.
9. Meagher C., Dimitrakopoulos R., Avis D. Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem – a review. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50. P. 508–526. DOI: 10.1134/S1062739114030132.

10. Breed M. F., van Heerden D. Post-pit optimization strategic alignment. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2016. Vol. 116, No. 2. P. 109–114. DOI: 10.17159/2411-9717/2016/v116n2a1.
11. Birch C. Optimization of cut-off grades considering grade uncertainty in narrow, tabular gold deposits. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017. Vol. 117, No. 2. P. 149–156. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n2a6.

REFERENCES:

1. Lane, K. F. (1988). *The economic definition of ore: Cut-off grades in theory and practice*. London: Mining Journal Books.
2. Ahmadi, M. R. (2018). Cutoff grade optimization based on maximizing net present value using a computer model. *Journal of Sustainable Mining*, 17(2), 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2018.04.002>.
3. Hryhoriev, Yu. I., Pylypchuk, D. I., Lebedenko, V. V., Lutsenko, S. O., & Perehudov, Yu. V. (2025). Adaptivne upravlinnia parametramy kompleksnoi mekhanizatsii vidkrytykh hirnychkykh robit za zminy bortovoho vmistu korysnoho komponenta [Adaptive management of parameters of complex mechanization of open-pit mining under changes in the cut-off grade of the useful component]. *Naukovyi zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky – Metinvest Polytechnic Scientific Journal. Series: Technical Sciences*, (4). <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-40>.
4. Hryhoriev, Yu. I. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti proektnykh rishen shchodo poshuku optymalnoho rezhymu hirnychkykh robit pry sumisnomu kompleksnomu vidpratsiuvanni tekhnohennykh i heohennykh rodovysch [Improving the efficiency of design decisions for finding the optimal mining regime under combined integrated extraction of technogenic and geogenic deposits]. *Kachestvo mineralnogo syrya – Quality of mineral raw materials*. Kryvyi Rih.
5. Hryhoriev, Yu. I., & Hryhoriev, I. Ye. (2016). Doslidzhennia rezhymu hirnychkykh robit z urakhuvanniam sumisnoho vidpratsiuvannia heohennoho y tekhnohennykh rodovysch [Study of the mining regime taking into account the combined extraction of geogenic and technogenic deposits]. In *Materialy III Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh «Perspektyvy rozvytku hirnychoi spravy ta ratsionalnoho vykorystannia pryrodnykh resursiv»* [Proceedings of the 3rd All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists “Prospects for the development of mining and rational use of natural resources”]. Zhytomyr: ZhDTU.
6. Lerchs, H., & Grossmann, I. F. (1965). Optimum design of open-pit mines. *Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, 58, 47–54.
7. Picard, J.-C. (1976). Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems. *Management Science*, 22(11), 1268–1272. <https://doi.org/10.1287/mnsc.22.11.1268>.
8. Hochbaum, D. S. (2008). The pseudoflow algorithm: A new algorithm for the maximum-flow problem. *Operations Research*, 56(4), 992–1009. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0524>.
9. Meagher, C., Dimitrakopoulos, R., & Avis, D. (2014). Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem – a review. *Journal of Mining Science*, 50, 508–526. <https://doi.org/10.1134/S1062739114030132>.
10. Breed, M. F., & van Heerden, D. (2016). Post-pit optimization strategic alignment. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(2), 109–114. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n2a1>.
11. Birch, C. (2017). Optimization of cut-off grades considering grade uncertainty in narrow, tabular gold deposits. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(2), 149–156. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n2a6>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 622.274

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-25>

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЄКТУ ПІДГОТОВКИ ГОРИЗОНТУ 607 М ШАХТИ ІМЕНІ КОЛАЧЕВСЬКОГО ПРАТ «ЦЕНТРАЛЬНИЙ ГЗК» В УСКЛАДНЕНИХ УМОВАХ

Каменець В'ячеслав Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-8169-2544

Поступаєв Дмитро Олександрович,

директор з операційних поліпшень,

Гірничодобувний департамент

ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ»

ORCID ID: 0009-0005-2494-4684

У статті розглядається послідовна і поетапна реалізація проєкту підготовки горизонту 607 м шахти імені Колачевського ПРАТ «Центральний ГЗК» в ускладнених гірничо-геологічних умовах та під час воєнного стану. Метою проєкту є збереження рівня видобутку цінної залізорудної сировини в річному обсязі 1,6 млн. тон на перспективу, як мінімум, до 2046 року. Наразі це єдина шахта в Криворізькому басейні, де видобуваються підземним способом бідні магнетитові кварцити з доправленням їх для переробки на Центральний гірничо-збагачувальний комбінат. На робочих горизонтах від ствола шахти у напрямку до родовища пройдено квершлаг, біля рудного тіла — польові штреки, з яких пройдено розкривні орти. Наразі поклад «Південна-Магнетитова» у гірничому відводі шахти імені Колачевського розробляється за допомогою поверхово-камерної системи розробки з обваленням руди та вміщуючих порід із застосуванням вібровипуску руди з очисних блоків. З огляду на складні тектонічні, гідрогеологічні та геомеханічні умови, обґрунтовано та реалізовано проєкт ефективної підготовки горизонту, який неодноразово коригувався відповідно до поточної ситуації та знаходиться на завершальній стадії. Проєкт містить обґрунтування та вибір способу ведення робіт, а саме підрядного, господарського або їх комбінації, оптимальних геобудівельних технологій та комплектів обладнання для спорудження комплексу підземних гірничих виробок, зокрема, камер, штреків, ортів-заїздів тощо. Виконано порівняння варіантів придбання нового або ремонту вартісного гірничошахтного обладнання. Дослідження спрямоване на розробку і впровадження ефективних підходів підготовки нового горизонту в ускладнених умовах. Наведено технічні рішення, шляхи реалізації та практичні результати, що підтверджують працездатність запропонованих підходів. Представлені матеріали можуть бути використані при проєктуванні підготовки глибоких горизонтів рудних шахт в подібних умовах. Наукова новизна роботи полягає в комплексному підході до проєктування геобудівельних технологій, врахуванні тектонічних і гідрогеологічних факторів, а також в оптимізації способу та порядку ведення прохідницьких робіт з метою ефективної та безпечної експлуатації родовища.

Ключові слова: магнетитові кварцити, підземний видобуток, штрек, орт-заїзд, камера, будівництво виробок, кріплення, прохідницька техніка.

Kamenets Viacheslav, Postupaiev Dmytro. Implementation of the project to prepare the 607-metre level of the Kolachevsky Mine, owned by PJSC 'Central Mining and Processing Plant', under challenging conditions

This article examines the systematic and phased implementation of the project to develop the 607-meter level of the Kolachevsky Mine, operated by PJSC "Central Mining and Processing Plant," under challenging mining and geological conditions and during martial law. The project's goal is to maintain an annual production level of 1.6 million tons of valuable iron ore raw materials for the near future, at least until 2046. Currently, this is the only mine in the Kryvyi Rih Basin where low-grade magnetite quartzites are mined underground and transported for processing to the Central Mining and Processing Plant. Crosscuts have been driven from the mineshaft toward the deposit along the working levels, and rock drifts have been excavated near the ore body, from which opening drifts have been driven. Currently, the "Pivdenna-Magnetitova" deposit in the mining allotment of the Kolachevsky Mine is being developed using a room-and-pillar mining system with the caving of ore and host rock, employing vibro-discharge of ore from the mining blocks. Given the complex tectonic, hydrogeological, and geomechanical conditions, a project for the effective preparation of the mining level was developed and implemented; it has been repeatedly adjusted in accordance with the current situation and is now in its final stage. The project includes a justification and selection of the method of work execution, namely contract, in-house, or a combination thereof, as well as optimal geotechnical technologies and equipment sets for the construction of a complex of underground mine workings, in particular,

chambers, drifts, access tunnels, etc. A comparison of options for purchasing new or repairing existing mining equipment has been performed. The study is aimed at developing and implementing effective approaches to preparing a new mining level under challenging conditions. Technical solutions, implementation methods, and practical results are presented, confirming the feasibility of the proposed approaches. The materials presented can be used in the design of deep ore mine levels under similar conditions. The scientific novelty of the work lies in a comprehensive approach to the design of geotechnical technologies, consideration of tectonic and hydrogeological factors, as well as in the optimization of the method and sequence of tunneling operations for the purpose of efficient and safe exploitation of the deposit.

Key words: magnetite quartzites, underground mining, adit, crosscut, chamber, tunnel construction, fastening, tunneling equipment.

Вступ. З метою збереження обсягу видобутку магнетитових кварцитів на рівні 1,6 млн т/рік у період 2025–2045 рр. необхідно було перейти на видобуток руди з горизонту 607 м. Термін реалізації проєкту неодноразово переносився, а сам проєкт коригувався. На поточний момент початок видобувних робіт на новому горизонті визначений у 2027 році.

У 2022 році шахта була перейменована з «Шахти ім. Орджонікідзе» на шахту імені Колачевського. Це найстаріша залізорудна шахта Кривбасу. Заснована у 1929 р. як шахта «Капітальна» на місці старої шахти рудника Колачевського (1911 р.). Видобувала багату маритову залізну руду. Нині розробляє магнетитові кварцити покладу «Південно-Магнетитова» на горизонтах – 527 та – 607 м з річною потужністю 1,6 млн. тон. У розробці одне велике рудне тіло, що дає змогу утримувати відносно низьку собівартість видобування руди, навіть у порівнянні з кар'єрами. Вміст загального заліза становить 37,94 %, а магнетитового — 27,67 %. Кінцевий продукт після переробки залізорудної сировини на збагачувальній фабриці Центрального ГЗК це концентрат з вмістом заліза 70% і окатки з вмістом 68%. [1, с. 31-43; 2, с. 19-36; 3, с. 475-483; 7, с. 12-17; 8, с. 31-43; 9, с. 72–80].

Робота сучасної рудної шахти є симбіозом і узгодженою взаємодією двох головних технологічних процесів: прохідницьких робіт з підготовки запасів і, власне, видобутку руди. Обидва процеси важливі і неподільні, оскільки перший створює фронт видобутку, а другий формує економічну базу для першого [10, с. 15-16]. Ефективне відпрацювання блоків на більших глибинах вимагає розробки комплексних технічних рішень, що враховують взаємовплив тектонічних порушень, гідрогеологічних особливостей і параметрів напруженого стану масиву.

Під підготовкою запасів розуміється проведення сукупності підготовчих виробок, необхідних для технологічно обґрунтованого окреслення ділянок шахтного поля, що підлягають виїмці (на даний період часу). В економічному плані підготовка нових горизонтів і блоків для підприємства є цілком витратною (інвестиційною)

частиною розробки родовища. Важливо підкреслити, що саме капітальні роботи зумовлюють темпи і, в кінцевому підсумку, можливі в майбутньому обсяги видобутку.

У науковій та виробничій літературі пропонується низка підходів до підготовки нових горизонтів рудних шахт, але кожне підприємство має свою специфіку, історію розвитку і наразі українські видобувні підприємства ніколи раніше не стикалися з особливостями функціонування в умовах воєнного стану і активних бойових дій. Це визначає необхідність адаптації підходів до організації виробництва, операційних поліпшень діяльності, вибору технологій до реальних умов діючих шахт проведення спеціалізованого дослідження, спрямованого на формування адаптованої системи підготовки, здатної забезпечити стійкість виробок і високу техніко-економічну ефективність видобутку.

Методи та методики дослідження. У роботі використано комплекс виробничих і інженерно-економічних методів, спрямованих на обґрунтування ефективних варіантів схем підготовки запасів нового горизонту – 607 м, технологій та комплектів обладнання в складних умовах задля збереження рівня видобутку цінної залізорудної сировини. Аналіз даних для проєктування містив визначення та аналіз геолого-тектонічної та гідрогеологічної інформації в межах покладу «Південно-Магнетитова», а також характеристик напружено-деформованого стану масиву гірських порід. Для оцінки варіантів на всіх етапах проєктування і коригування використовувалися нормативні методи розрахунку стійкості гірських порід і руди, а також враховувався комплекс факторів, які мали значущий вплив у поточний момент. Практична частина дослідження базувалася на моніторингу результатів впровадження технічних рішень у виробничих умовах з наступним аналізом їх ефективності, впливу на виробничі показники та безпеку гірничобудівельних робіт. [11, с. 12-17; 12, с. 31-43; 13, с. 22–30].

Результати. Початковий варіант проєкту 2013 року.

Відповідно до технічного завдання на проєктування інститутом ДП «ДПІ «Кривбаспроєкт»

було визначено техніко-економічні показники проєкту «Розкриття та розробка запасів родовища «Південна-Магнетитова» на поверхнях 527–447 м, 607–527 м шахти імені Орджонікідзе» (з 2022 року шахта Колачевського). Видобуток залізистих кварцитів передбачався, починаючи з поверху 527–447 м, з поступовим зниженням гірничих робіт на поверхх 607–527 м. Продуктивність шахти з видобутку руди – 1 600 тис. т на рік.

Товарною продукцією підприємства за проєктом був високоякісний залізорудний концентрат з вмістом заліза 68%, що отримується шляхом переробки видобутої сирової руди на збагачувальній фабриці ПРАТ «Центральний ГЗК». Проєкт «Розкриття та розробка запасів покладу «Південна-Магнетитова» на поверхнях 527–447, 607–527 м шахти ім. Орджонікідзе» виконувався згідно з договором з ПАТ «ЦГОК» (№ 3807/13202 від 25.12.2013 р.). Об'єктом проєктування були підземні та поверхневі об'єкти шахти імені Орджонікідзе.

Структуру інвестицій в проєкт станом на 2014 рік наведено на рис. 1.

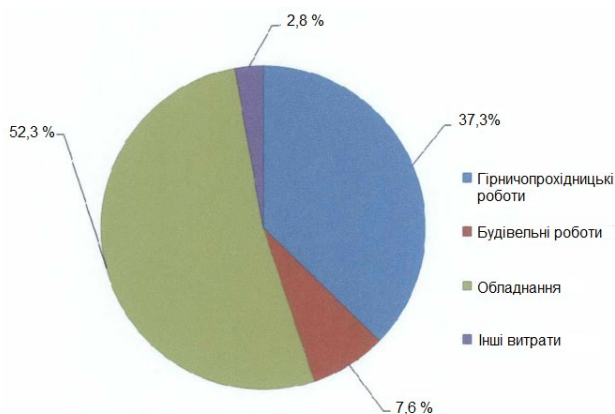


Рис. 1. Структура інвестицій у проєкт по першому варіанту

Технологічну схему будівництва підземних виробок за проєктом наведено на рис. 2.

Перший варіант проєкту був розроблений просто напередодні початку вторгнення РФ і початку збройного конфлікту, відповідно його реалізацію було відкладено.

Зовнішні та виробничі ризики при реалізації проєкту підготовки горизонту 607 м.

Безумовно, найбільшим ризиком для виробництва є бойові дії, спричинені збройною агресією РФ, які і стали приводом для неодноразового коригування проєкту з 2013 по 2025 рр. і переносу термінів його завершення.

Якщо ж сформулювати по суті ризик відмови від реалізації проєкту на старті в 2014 році, то

мало б місце зменшення обсягу видобутку руди на 30,5 млн т у період 2024–2042 рр. Наслідки реалізації ризику: Зниження видобутку руди, тобто втрати товарного концентрату в обсязі $(30,5 \times 0,357) = 10,8$ млн т. Оцінка ймовірності настання цього ризику: Відмова від проєкту призвела б до вичерпання запасів шахти у 2024–2026 рр. та зупинки шахти.

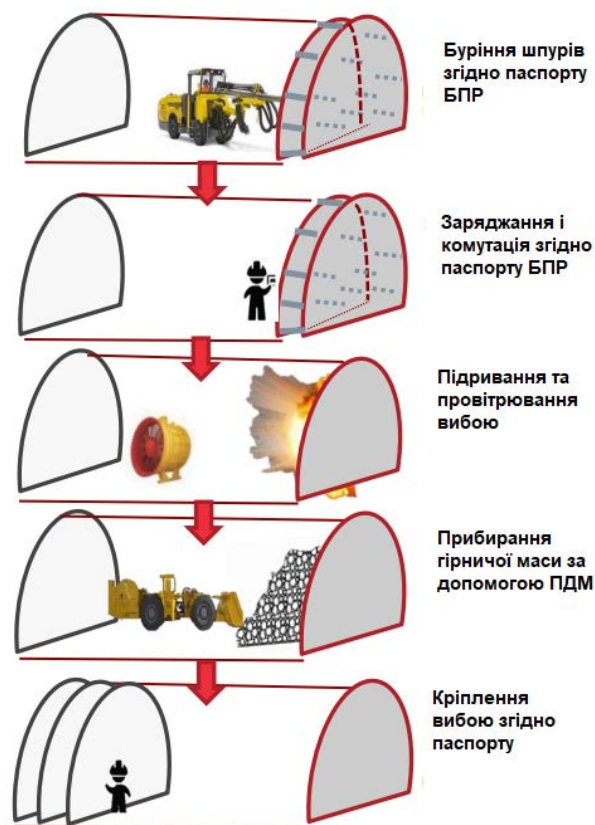


Рис. 2. Технологічна схема будівництва підземних виробок

Схему будівництва одного з основних об'єктів – камери тягової понижувальної підстанції горизонту – 607 м показано на рис. 3.

Заходи щодо зниження рівня ризику на першому етапі: проведення підготовчих робіт з проходки основних виробок на глибині 607 м для забезпечення можливості введення в експлуатацію горизонту та його подальшого розвитку в рамках виконання виробничої програми з видобутку шахтної руди в обсязі 1,6 млн т/рік упродовж 2024–2042 рр.

Додатково треба враховувати, що в історії шахти Колачевського 13.06.2010 була масштабна аварія з людськими жертвами, коли в результаті підривання підземних зарядів для відбійки руди з невірно розрахованими параметрами на поверхні утворився провал площею 16 га і глибиною 10–80 м.

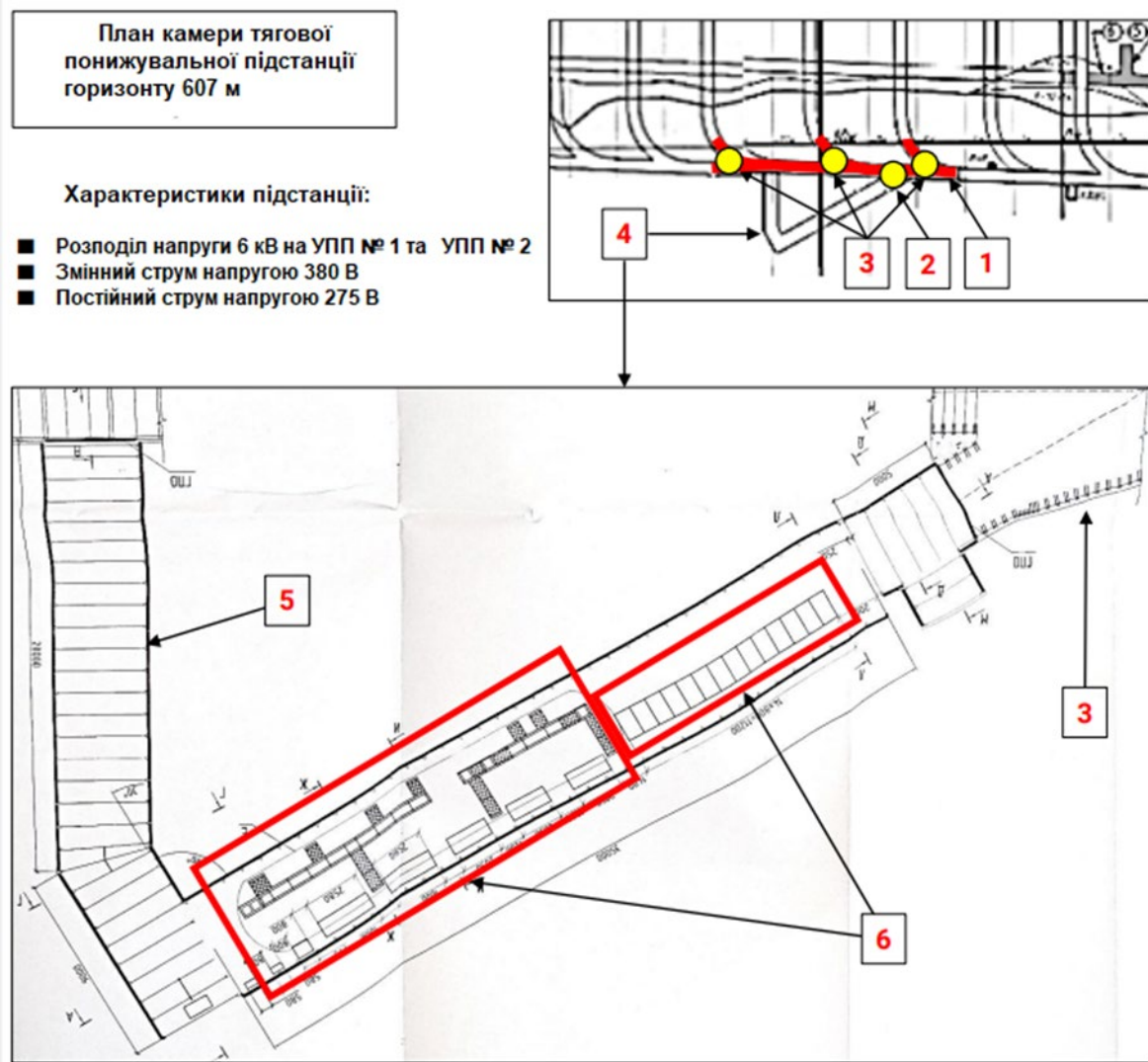


Рис. 3. Схема будівництва камери тягової понижувальної підстанції горизонту – 607 м

Обвал ґрунту на території промислового майданчика стався під час виконання планових підричних робіт на шахті на глибині 447 м (еквівалент вибухівки 64 тони). В результаті обвалу поверхні на території шахти в провалі опинилися 4 автомобілі, в одному з яких перебував водій. Частково було пошкоджено будівлі і споруди промислового майданчика шахти, дорогу від шахти та порушено газопостачання до села Горького. Після цього випадку вода і повітря закуповуються для шахти у ПРАТ «Криворізький залізрудний комбінат».

Ствол «Флангова» пройдено від поверхні до горизонту 1350 м; він слугує для відведення відпрацьованого повітря з робочих горизонтів і є запасним виходом на поверхню. На горизонті 607 м передбачається будівництво приствольного двору шахти «Флангова» та прокладення вентиляційного квершлягу для забезпечення вентиляції гірничих робіт. Ствол

«Північна-Вентиляційна» пройдено від поверхні до глибини 1125 м і призначений він для видачі відпрацьованого вентиляційного потоку.

У проєкті, що розглядається, стволи «Флангова» та «Північна-Вентиляційна», що належать ПАТ «Кривбасзалізрудком», включені до єдиної схеми провітрювання гірничих робіт шахти імені Орджонікідзе ПАТ «ЦГОК» на період відпрацювання запасів родовища «Південна-Магнетитова» вище гор. – 607 м.

Коригування проєкту. 2018 року.

Згідно з коригуванням 2018 року обсяг річного видобутку руди на шахті ім. Орджонікідзе становить 1,5 млн т руди. Згідно з проєктом щодо розробки родовища кварцитів на шахті ім. Орджонікідзе в період 2024-2025 рр. необхідно переходити на видобуток руди на нижній горизонт – 607 м у зв'язку з вичерпанням запасів руди на горизонті – 527 м. Даний перехід ідентичний роботам з розширення кар'єру в частині

його поглиблення для видобутку руди з нижніх горизонтів, передбачений у технологічній стратегії та дозволяє зберегти видобуток руди підземним способом в обсязі 1,5 млн т/рік, що еквівалентно 550 тис. т концентрату.

Забезпечення планових обсягів видобутку магнетитових кварцитів на шахті ім. Орджонікідзе на рівні 1 500 тис. т/рік у період 2024–2042 рр. за рахунок введення в експлуатацію горизонту 607 м. Ключова мета: пройти 15,6 тис. м. куб. виробки у період 2019–2020 рр. та ввести горизонт 607 м в експлуатацію.

Поточна ситуація на шахті та розподіл видобутку руди по горизонтах за варіантом 2018 року наведено на рис. 4 і рис. 5.

Були передбачені до будівництва наступні об'єкти: Депо з ремонту рухомого складу.

Камера ремонту самохідної техніки. Вентиляційний колектор. Відкотний штрек висячого боку. Відкотний штрек лежачого боку. Вентиляційно-прохідні підняттяві.

Відбулася зміна концепції проєкту, а саме: Спочатку планувалося здійснити 100% проходки силами підрядника, з поділом на 2 черги будівництва.

Після детального опрацювання з інститутом було проведено поділ усієї проходки на гірничо-капітальні роботи (для введення в експлуатацію) та гірничо-підготовчі роботи (підготовка рудного тіла до видобутку). При цьому гірничо-підготовчі роботи відносяться до бюджету поточних витрат підприємства і були виключені з бюджету капітальних інвестицій на будівництво горизонту.

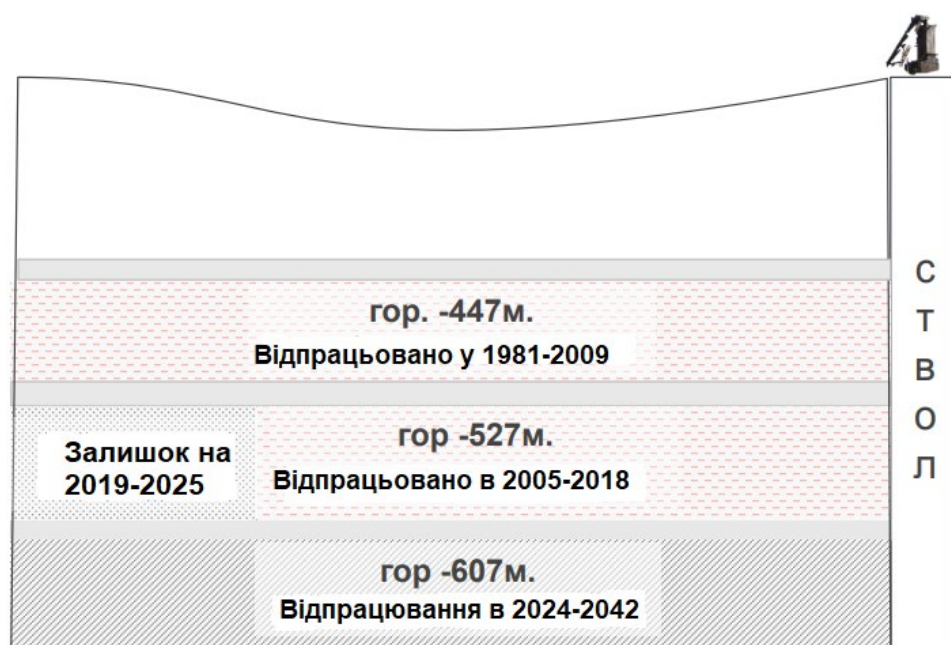


Рис. 4. Поточна ситуація на шахті станом на 2018 рік

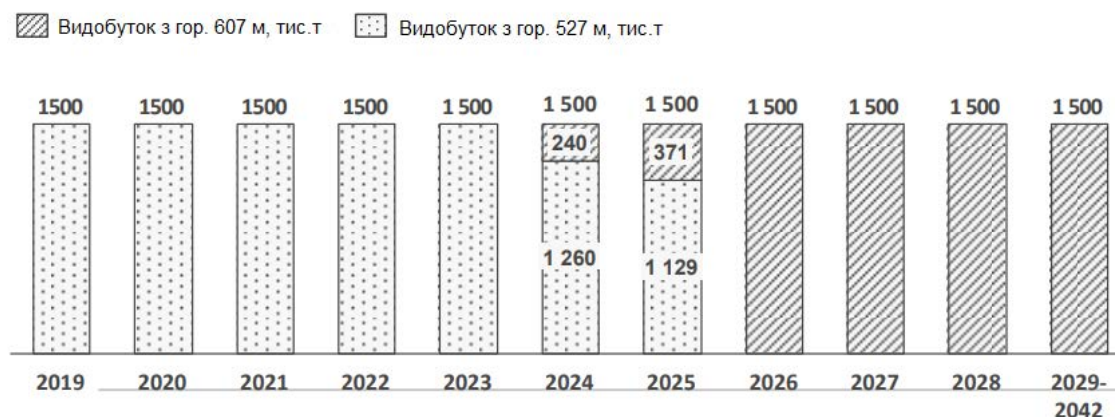


Рис. 5. Розподіл видобутку по горизонтах за варіантом 2018 року

Даний підхід повністю відповідає поточному розподілу витрат, що застосовувався на діючому тоді горизонті 527 м.

Також було оптимізовано ряд проєктних рішень:

1. Відмова від проходки вентиляційного квершлягу на гор. 607 м. (довжина 751 м) до ствола «Флангова» за рахунок організації схеми аварійного виходу через існуючу збійку із стволом «Флангова» на горизонті – 387 м.

2. Відмова від проходки камери ВМ за рахунок експлуатації існуючої на висоті 447 м.

3. Зменшення обсягу будівництва камери ремонту самохідної техніки за рахунок використання фактичних пройдених виробок

План горизонту – 607 м зі зміненою концепцією наведено на рис. 6.

З метою забезпечення обсягу видобутку магнетитових кварцитів на рівні 1,6 млн т/рік у період 2025–2045 рр. необхідно було перейти на видобуток руди з горизонту 607 м. Для цього потрібно переміщення та обслуговування прохідницької техніки у спеціально обладнаній камері на горизонті 607 м:

- навантажувально-доставні машини (3 одиниці);
- самохідні бурові установки (3 одиниці);
- установка для глибокого буріння (1 одиниця).

Отже, у 2023–2024 рр., згідно з скоригованим проєктом, необхідно було виконати будівельні роботи та монтаж механічного й електричного обладнання в камері ремонту самохідної техніки.

Схема камери ремонту самохідної техніки показано на **рис. 7**.

Коригування проєкту. 2023-2025 роки.

Пріоритетом оновлення проєкту у 2023-2025 роках стало спорудження ортів-заїздів

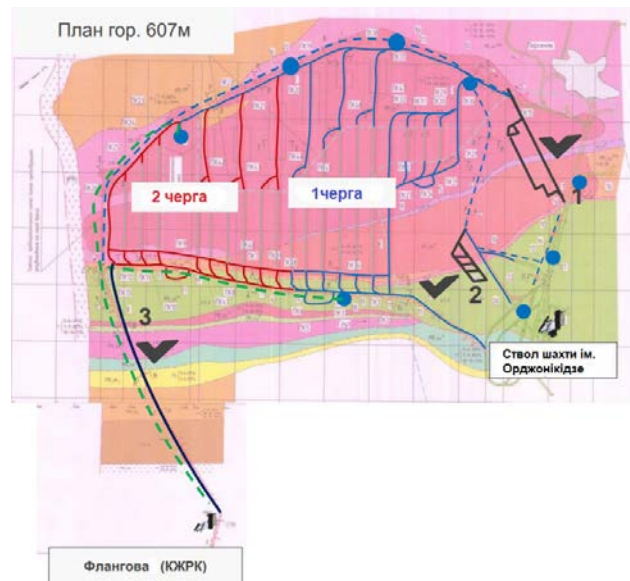


Рис. 6. План горизонту – 607 м зі зміненою концепцією проєкту

на горизонті – 527 м та штреку лежачого боку на гор. – 607 м з наступним обґрунтуванням:

Запас руди готової до видобутку з двох експлуатаційних блоків (-46)-(-53) лежачого боку та (-53)-(-61) на початок 2026 р. становитиме 1,037 млн. т (з урахуванням видобутку в 2025 рр. Графіком взаємозамінності вибоїв у 2026 році передбачено видобуток руди з блоків в осях (-16)-(-8) та (-8)-(+12) гор.527 м у кількості 0,345 та 0,144 млн. т. відповідно.

Для забезпечення видобутку руди 1,6 млн. т/рік з 2025 році необхідно було ввести запаси за рахунок будівництва орт-заїздів (-11) та (+1) осей на гор.527м. Ключові терміни

СХЕМА КАМЕРИ САМОХІДНОЇ ТЕХНІКИ



Рис. 7. Схема камери ремонту самохідної техніки

наступні: 01.01.26 – початок дій згідно проєкту; 31.08.26 – введення в експлуатацію (фізичне); 10.10.26 – завершення проєкту (повне).

Схема та параметри спорудження ортів-заїздів наведені на рис. 8, а обсяги робіт в таблиці 1.

Будівництво штреку лежачого боку гор. – 607 м.

В 2030 необхідно завершити підготовку блоків в осях (-21) та (-19)-(-26), для початку видобутку в 2030-2031 рр., тобто виконати будівництво штреку лежачого боку та трьох сполучень

штреку з (-17), (-21) та (-24) орт-заїздами гор. – 607м, рис. 9 і 10.

Наразі гірничобудівельні роботи з підготовки нових експлуатаційних блоків тривають, терміни повністю не витримуються, але з об'єктивних причин зовнішнього характеру. В той же час необхідно відзначити значуще скорочення відставання від початкового графіку виконання робіт з будівництва комплексу виробок горизонту – 607 м. Згідно графіку

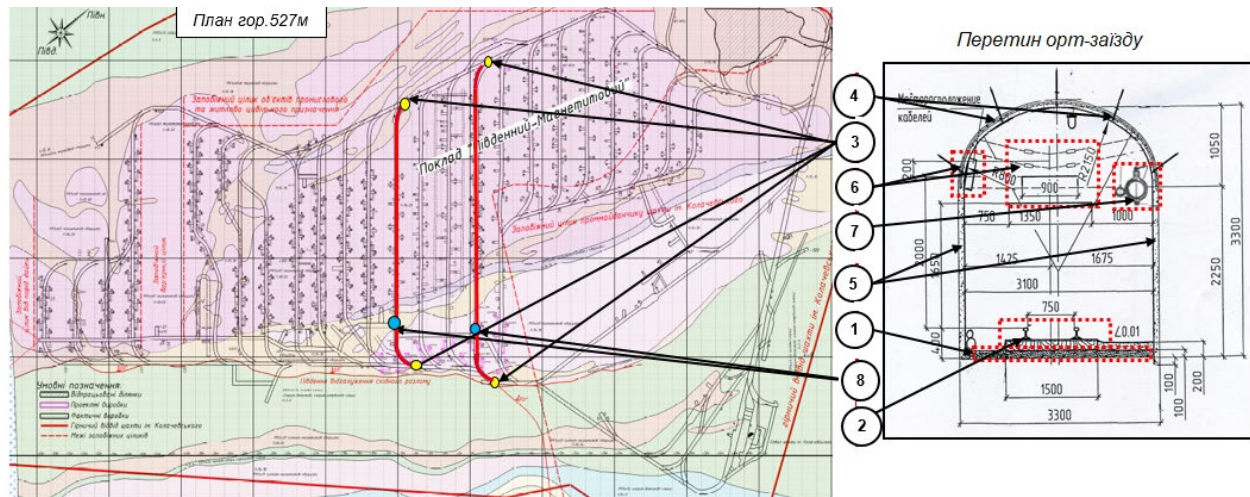


Рис. 8. Схема та параметри спорудження ортів-заїздів

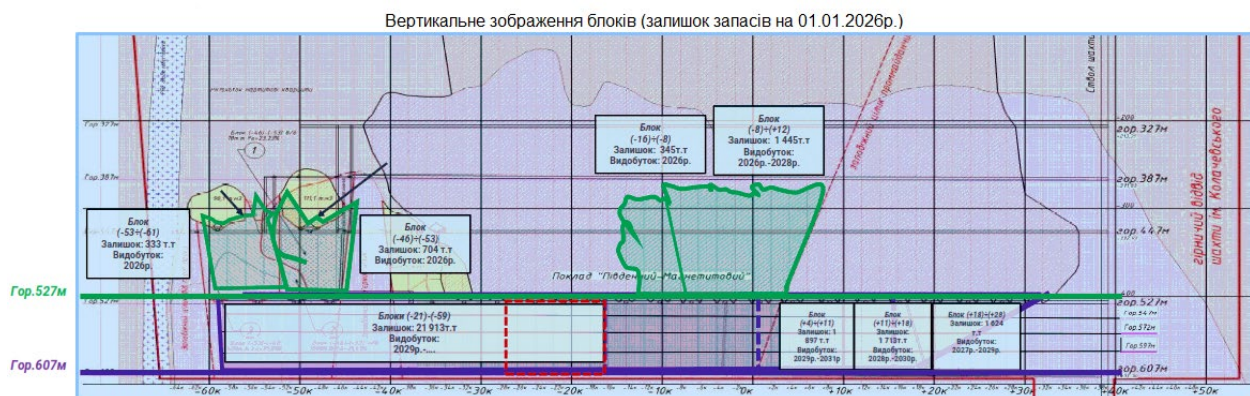


Рис. 9. Розріз по блоках з розташуванням штреку лежачого боку

Таблиця 1

Обсяги робіт по орт-заїздам

№№	Найменування робіт	Од. виміру	Кількість
1	Прибирання гірничої маси	м ³	120
2	Укладання рейкової колії	м.п.	610
3	Монтаж стрілкового переводу	шт	4
4	Анкерне кріплення виробіток	шт	30
5	Торкретування	м ³	290
6	Монтаж контактної та силової мережі	м.п.	610
7	Монтаж магістралі технічної води	м.п.	610
8	Монтаж вентилятора ВМЕУ-6	шт.	2

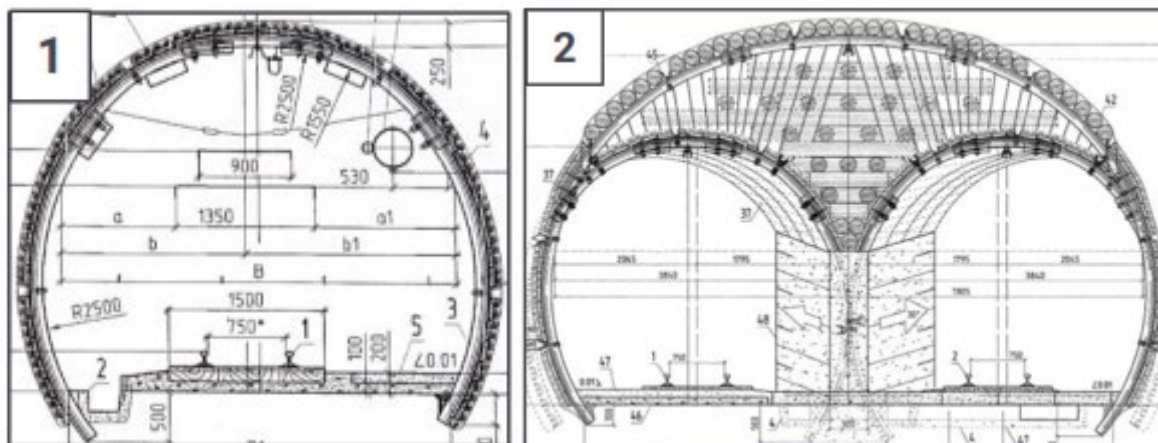


Рис. 10. Перетини штреку лежачого боку (1) та його сполучення з орт-заїздами (2)

взаємозамінності вибоїв по шахті імені Колачевського на 2026-2030 роки, затвердженому у 2025 році, у 2027 році в експлуатації буде один блок нового горизонту, у 2028 – два блоки, у 2029 і надалі – три блоки. Видобувні роботи на вище розташованих горизонтах припиняться.

Висновки

1. В умовах воєнного стану в Україні не припиняються інвестиційні процеси і проекти, зокрема, в гірничодобувній промисловості. Одним із прикладів є шахта Колачевського ПРАТ «Центральний ГЗК», де прийнятий і реалізується, хоча і з затримкою і коригуванням, проєкт підготовки горизонту – 607 м для збереження рівня видобутку магнетитових кварцитів на рівні 1,6 млн. тон на рік.

2. Коригування проєкту спрямовані на максимально заощадливе використання ресурсів, а саме: після порівняння та обґрунтування шахта відмовилася від послуг підрядних

організацій і виконує гірничопрохідницькі роботи господарським способом, також порівнювалися варіанти придбання нового гірничопрохідницького обладнання або капітального ремонту наявного і були обрані оптимальні варіанти.

3. В проєкті максимально використовується існуюча мережа підземних гірничих виробок і допоміжне обладнання. Застосовуються відомі і перевірені геобудівельні технології разом з впровадженням новітніх розробок, зокрема у системах кріплення та веденні буровибухових робіт.

4. Скорочене відставання від вихідного графіку будівництва комплексу виробок горизонту – 607 м. Згідно затвердженому у 2025 році графіку взаємозамінності вибоїв по шахті, у 2027 році в експлуатацію стане один блок нового горизонту, у 2028 вже два блоки, у 2029 і надалі – три блоки із збереженням річної потужності. Вище розташовані горизонти відпрацьовують запаси руди і роботи там припиняються.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Методичні рекомендації щодо формування собівартості продукції (робіт, послуг) у промисловості. Затверджені наказом Міністерства промислової політики України від 09.07.2007 № 373. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0373581-07#Text>
2. Податковий Кодекс України от 02.12.2010. № 2755-VI в поточній редакції. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text>
3. Гірничий закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1127-14#Text>
4. Положення про проектування гірничодобувних підприємств України та визначення запасів корисних копалин за ступенем підготовленості до видобування. ЗАТВЕРДЖЕНО Наказом Міністерства промислової політики України 07.05.2004 № 221. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0846-04#Text>
5. Закон України від 27 березня 2014 року № 1166-УН «Про запобігання фінансовій катастрофі та створення передумов для економічного зростання в Україні». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1166-18#Text>
6. Національний класифікатор України: Класифікатор професій. Затверджено наказом Держспоживстандарту України від 28.07.2010. №327. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va327609-10#Text>
7. Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств з підземним способом видобутку залізних руд. Розділ 14. Техніко-економічні показники. Проект. ДП «ДПІ «Кривбаспроект». 2014.

8. Грицина О.Є., Драгун Б.Т., Гук А. Ю. та ін. Особливості системи економічних показників у нормах технологічного проектування гірничодобувних підприємств з підземним способом видобутку залізних руд. Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. Кривий Ріг. 2014. Вип. 37. 267–272. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/1777>
9. Muflih Hidayat. BHP Rio Tinto Deploy New Mines for Higher Iron Ore Grades Discovery Alert. December 23. 2025. URL: <https://discoveryalert.com.au/technological-innovation-resource-security-iron-ore-2025/>.
10. Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення : НПАОП 0.00-1.66-13 : затв. наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 12.06.2013 р. № 355. Дата оновлення: 16.02.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1127-13#Text>
11. Порядок обліку вибухових матеріалів промислового призначення : НПАОП 0.00-6.04-06 : затв. наказом МНС України 06.07.2006 р. № 424. Дата оновлення: 16.08.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0828-06#Text>
12. Перелік вибухових матеріалів, допущених до постійного виробництва та застосування : затв. наказом Міністерством розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України від 07.04.2020 р. № 650. Дата оновлення: 25.10.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0650915-20#Text>
13. Вимоги щодо забезпечення заходів охорони об'єктів поверхні в умовах шкідливого впливу гірничих робіт. Затверджені Наказом Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України 11 грудня 2020 року № 2602. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0138-21#Text>
14. Правила безпеки під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин підземним способом. Затверджені Наказом Міністерства соціальної політики України 23.12.2016 № 1592. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0129-17#Text>

REFERENCES:

1. Metodychni rekomendatsii shchodo formuvannia sobivartosti produktsii (robit, posluh) u promyslovosti. (2007) [Guidelines for Calculating the Cost of Production (Works, Services) in Industry.] Zatverdzhenni nakazom Ministerstva promyslovoi polityky Ukrainy vid 09.07.2007 № 373. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0373581-07#Text> [in Ukrainian]
2. Podatkovyi Kodeks Ukrainy ot 02.12.2010. [Tax Code of Ukraine] (2010) № 2755-VI v potochinii redaktsii. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text> [in Ukrainian]
3. Hirnychyi zakon Ukrainy. (1999) [Mining Law of Ukraine] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1127-14#Text> [in Ukrainian]
4. Polozhennia pro proiektuvannia hirnychodobuvnykh pidpriemstv Ukrainy ta vyznachennia zapasiv korysnykh kopalyn za stupenem pidhotovlenosti do vydobuvannia. (2004) [Regulations on the Design of Mining Enterprises in Ukraine and the Classification of Mineral Reserves by Degree of Readiness for Extraction.] Zatverdzheno Nakazom Ministerstva promyslovoi polityky Ukrainy 07.05.2004 № 221. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0846-04#Text> [in Ukrainian]
5. Zakon Ukrainy vid 27 bereznia 2014 roku № 1166-UN «Pro zapobihannia finansovii katastrofi ta stvorennia peredumov dlia ekonomichnoho zrostantia v Ukraini» (2014) [Law of Ukraine No. 1166-UN of March 27, 2014, “On Preventing a Financial Crisis and Creating Conditions for Economic Growth in Ukraine”]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1166-18#Text> [in Ukrainian]
6. Natsionalnyi klasyfikator Ukrainy: Klasyfikator profesii. (2010) [National Classifier of Ukraine: Classification of Occupations.] Zatverdzheno nakazom Derzhspozhyvstandartu Ukrainy vid 28.07.2010. №327. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va327609-10#Text> [in Ukrainian]
7. Normy tekhnolohichnoho proiektuvannia hirnychodobuvnykh pidpriemstv z pidzemnym sposobom vydobutku zaliznykh rud. (2014) [Standards for the technical design of mining enterprises engaged in the underground extraction of iron ore.] Rozdil 14. Tekhniko-ekonomichni pokaznyky. Proekt. DP «DPI «Kryvbasproiekt». 2014. [in Ukrainian]
8. Hrytsyna O.Ie., Drahun B.T., Huk A. Yu. ta in. (2014) Osoblyvosti systemy ekonomichnykh pokaznykiv u normakh tekhnolohichnoho proiektuvannia hirnychodobuvnykh pidpriemstv z pidzemnym sposobom vydobutku zaliznykh rud. [Characteristics of the system of economic indicators in the technical design standards for mining enterprises engaged in underground iron ore extraction.] Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu : zb. nauk. prats. Kryvyi Rih. Vyp. 37. 267–272. Retrieved from <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/1777> [in Ukrainian]

9. Muflih Hidayat. (2025) BHP Rio Tinto Deploy New Mines for Higher Iron Ore Grades Discovery Alert. December 23, 2025. Retrieved from <https://discoveryalert.com.au/technological-innovation-resource-security-iron-ore-2025/>.

10. Pravyla bezpeky pid chas povodzhennia z vybukhovymy materialamy promyslovoho pryznachennia (2024): NPAOP 0.00-1.66-13 [Safety Rules for Handling Industrial Explosives]: zatv. nakazom Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy vid 12.06.2013 r. № 355. Data onovlennia: 16.02.2024.: Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1127-13#Text> [in Ukrainian]

11. Poriadok obliku vybukhovyykh materialiv promyslovoho pryznachennia (2022): NPAOP 0.00-6.04-06 [Procedures for the Accounting of Industrial Explosives]: zatv. nakazom MNS Ukrainy 06.07.2006 r. № 424. Data onovlennia: 16.08.2022. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0828-06#Text> [in Ukrainian]

12. Perelik vybukhovyykh materialiv, dopushchenykh do postiinoho vyrobnytstva ta zastosuvannia (2021): [List of Explosive Materials Approved for Regular Production and Use] zatv. nakazom Ministerstvom rozvytku ekonomiky, torhivli ta silskoho hospodarstva Ukrainy vid 07.04.2020 r. № 650. Data onovlennia: 25.10.2021. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0650915-20#Text> [in Ukrainian]

13. Vymohy shchodo zabezpechennia zakhodiv okhorony ob'ektiv poverkhni v umovakh shkidlyvoho vplyvu hirnychyykh robit. (2020) [Requirements for ensuring the protection of surface facilities under conditions of adverse effects from mining operations] Zatverdzeni Nakazom Ministerstva rozvytku ekonomiky, torhivli ta silskoho hospodarstva Ukrainy 11 hrudnia 2020 roku № 2602. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0138-21#Text> [in Ukrainian]

14. Pravyla bezpeky pid chas rozrobky rodovyshch rudnykh ta nerudnykh korysnykh kopalyn pidzemnym sposobom. (2016) [Safety Rules for the Underground Mining of Ore and Non-Ore Minerals.] Zatverdzeni Nakazom Ministerstva sotsialnoi polityky Ukrainy 23.12.2016 № 1592. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0129-17#Text> [in Ukrainian]



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 10.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 622.74:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-26>

ВИКОРИСТАННЯ ТОНКОГО ГРОХОЧЕННЯ В СХЕМАХ ПЕРЕРОБКИ ТОНКОПОДРІБНЕНИХ МАГНЕТИТОВИХ ПРОДУКТІВ ЗБАГАЧЕННЯ

Купін Андрій Іванович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерних систем
та мереж технології будівельних виробів та матеріалів
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0001-7569-1721

Вільгельм Марина Миколаївна,

доктор філософії, провідний технолог
ТОВ «Метінвест Січсталь»
ORCID ID: 0009-0003-5303-2954

У цій статті розглядається актуальність використання операції тонкого грохочення в переробці корисних копалин. Огляд публікацій різних авторів дозволяє зробити висновок, що застосування тонкого грохочення відіграє вирішальну роль у класифікації тонкоподрібнених продуктів збагачення технологічних схем, безпосередньо впливаючи на якість кінцевого продукту та загальну продуктивність процесу. Метою даних досліджень є оцінка можливості застосування у схемах переробки тонкоподрібнених магнетитових продуктів збагачення тонкого грохочення для доведення кінцевих концентратів. Дослідження базується на вивченні особливостей гранулометричного складу та співвідношення типів зростання і вмісту рудного компонента. Аналіз гранулометричного складу показав, що найбільший вміст заліза загально-го сконцентрований у класі -0,02 мм (68,56% та 69,8%), що підтверджено вмістом рудного компонента (89% та 91%). Також на основі аналізу гранулометричного складу доведено доцільність використання для тонкого грохочення ситової панелі з розміром отворів -0,053 мм за рахунок високого вмісту в живленні грохоту класу -0,05 мм. Після вибору ситової панелі у дослідженні проведено експеримент з використанням грохоту Derrick Stack Sizer 2SG48-60W-1STK, який підтверджує доцільність застосування операції тонкого грохочення для тонкоподрібнених магнетитових продуктів збагачення з метою підвищення якості товарної продукції. В статті також зазначено, що процес тонкого грохочення є багатofакторним і потребує більш детально вивчення з проведенням серії експериментів. Практичне значення цього дослідження полягає в обґрунтуванні доцільності застосування операцій тонкого грохочення для тонкоподрібнених магнетитових продуктів збагачення.

Ключові слова: гранулометричний склад, крупність частинок, тонке грохочення, поверхні для грохочення, продуктивність, ефективність грохочення, магнетит, збагачення

Kupin Andrey, Vilhelm Maryna. The use of fine screening in processing circuits for finely ground magnetite products beneficiation

This article examines the relevance of using fine screening in mineral processing. A review of publications by various authors leads to the conclusion that the use of fine screening plays a decisive role in the classification of finely ground beneficiation products in processing schemes, directly affecting the quality of the final product and the overall productivity of the process. The aim of this research is to evaluate the feasibility of using fine screening in processing schemes for finely ground magnetite enrichment products to produce final concentrates. The study is based on an analysis of the characteristics of the particle size distribution and the ratio of grain growth types to the ore component content. Analysis of the particle size distribution showed that the highest content of total iron is concentrated in the -0.02 mm fraction (68.56% and 69.8%), which is confirmed by the ore component content (89% and 91%). Furthermore, based on the analysis of the particle size distribution, the feasibility of using a screen panel with a mesh size of -0.053 mm for fine screening was demonstrated due to the high content of the -0.05 mm fraction in the feed. After selecting the screen panel, an experiment was conducted using a Derrick Stack Sizer 2SG48-60W-1STK, which confirms the feasibility of applying fine screening to finely ground magnetite beneficiation products to improve the quality of commercial products. The article also notes that the fine screening process is multifactorial and requires more detailed study through a series of experiments. The practical significance of this study lies in substantiating the feasibility of applying fine screening operations to finely ground magnetite beneficiation products.

Key words: particle size distribution, particle size, fine screening, screening surfaces, throughput, screening efficiency, magnetite, beneficiation.

Вступ. В останні десятиліття у технології переробки мінеральної сировини спостерігається стійка тенденція до збільшення частки тонкоподрібнених матеріалів. Це пов'язано з погіршенням якості рудної бази та необхідністю кращого розкриття корисних мінералів [1].

Дослідження показують, що застосування тонкого грохочення у стадіях подрібнення та фінальних стадіях доведення дозволяє суттєво підвищити якість концентрату. Тонке грохочення все частіше розглядається як альтернатива гідроциклонам та іншим апаратам для класифікації). Це зумовлено тим, що: грохот забезпечує геометричний поділ за розміром, а не за гідравлічними характеристиками [2].

Застосування тонкого грохочення в лабораторних та промислових умовах висвітлено в багатьох наукових публікаціях, дисертаційних роботах тощо.

Автори [3] відзначають, що включення в технологічну схему операції тонкого грохочення дозволяє підвищити питому продуктивність млина, знизити навантаження на вузол подрібнення, а також зменшити проблему переподрібнення матеріалу відповідної крупності. Також відмічається, що ефективність роботи грохоту значно вище у порівнянні навіть з найбільш продуктивними гідроциклонами.

На Полтавському ГЗК було запропоновано технологічну схему переробки тонкокраплених магнетитових кварцитів, яка включає операцію тонкого грохочення [4]. Реалізація даної схеми забезпечила збільшення вмісту заліза в товарному продукті на 1,5%. У процесі експериментальних досліджень також встановлено, що надрешітний продукт, який утворюється в ході тонкого грохочення, вимагає додаткової переробки в окремому технологічному контурі – додаткове подрібнення матеріалу з подальшим збагаченням на високоселективних сепараторах.

На багатьох збагачувальних фабриках, що переробляють мідні, поліметалеві, фосфатні та залізні руди проведені промислові випробування високочастотних вібраційних грохотів у замкнутих циклів подрібнення [5]. Аналіз результатів впровадження цієї технології на підприємствах Colquijirca (Перу), Cerro Lindo та Condestable (Перу) показав суттєве підвищення ефективності класифікації продуктів подрібнення – на рівні 20–25%. Середня продуктивність млинів зросла на 31,6%, а величина циркуляційного навантаження знизилася на 51,4%. Отримані дані підтверджують високу результативність використання високочастотних вібраційних грохотів у замкнутих схемах подрібнення.

Аналіз публікацій доводить доцільність виконання дослідження використання операції тонкого грохочення в схемах доведення магнетитових концентратів. Метою даних досліджень є оцінка можливості застосування у схемах переробки тонкоподрібнених магнетитових продуктів збагачення тонкого грохочення на підставі вивчення особливостей гранулометричного складу та співвідношення типів зростання і вмісту рудного компоненту.

Методи та методики дослідження. В рамках оцінки можливості застосування тонкого грохочення для доведення тонкоподрібнених магнетитових концентратів ПРАТ «ІНГЗК» відібрані проби флотаційних концентратів різної якості [6-8].

Кожна проба була підготовлена для проведення хімічних [9-11], гранулометричних [12] та мінералогічних аналізів [13].

Гранулометричний аналіз проб виконувався з використанням сухого та мокрого розсіву, седиментаційний аналіз використовувався для визначення класів крупності менше 0,044 мм.

Операція тонкого грохочення виконувалась з використанням напівромислового грохоту 2SG48-60W-1STK з подальшою оцінкою живлення грохоту, підрешітного та надрешітного продуктів.

Обладнання та матеріали для проведення експерименту:

- грохот 2SG48-60W-1STK;
- ситова поверхня з отвором сит 0,053 мм;
- живильник вібраційний;
- приймальні ємності для надрешітного та підрешітного продуктів;
- лабораторні ваги;
- секундомір;
- пробовідбірники;
- флотаційні концентрати різної якості.

Живлення рівномірно подається на робочу поверхню грохоту за допомогою живильника. Матеріал, який залишається на поверхні – надрешітний продукт, матеріал який проходить крізь сито – підрешітний продукт.

Відбір проб здійснюється з живлення, надрешітного та підрешітного продуктів та проводиться через рівні інтервали часу.

Навантаження на ситову панель підтримується на рівні 7,0 т/год, вміст твердого на рівні 40 %. Частота коливань деки грохоту не змінюється та складає 50 Гц. Амплітуда коливань грохоту дорівнює 0,7 мм та не підлягає регулюванню.

В рамках експерименту відстежуються наступні параметри: навантаження на деку грохоту, вміст заліза загального у живленні пульпи,

надрешітному та підрешітному продуктах, щільність пульпи, % твердого у живленні.

Результати. В процесі виконання дослідження визначені гранулометричні склади флотаційних концентратів за класами крупності. Мінералогічна оцінка виконана за типом зростання та вмістом рудного компоненту.

Результати хімічних, гранулометричних та мінералогічної оцінки наведені в таблицях 1-5.

На основі даних гранулометричних аналізів наведених в таблицях 2,4 доведено можливість застосування тонкого грохочення для дозбагачення флотаційних концентратів. Враховуючи значний вміст класу -0,05 мм на рівні 96,69-96,73 % доцільним було проведення грохочення на ситовій панелі з отвором сит 0,053 мм на напівпромисловому грохоті Derrick Stack

Sizer 2SG48-60W-1STK.

Для кожного з концентратів були виконано по три дослідження. Дані експерименту зафіксовані в таблиці 6.

Отримані результати дозволяють зробити висновок доцільності операції тонкого грохочення для доведення кінцевих концентратів. Застосування операції тонкого грохочення дозволить отримати концентрати Fe_{заг.} 68-69 %.

Слід зазначити, що дослідження проводилось в стаціонарному режимі без оцінки впливу факторів на процес розділення.

Продуктивність та ефективність грохочення залежать від багатьох факторів, які можна поділити на дві групи:

– фактори, що залежать від фізико-механічних властивостей вихідного матеріалу

Таблиця 1

Хімічний склад флотаційних концентратів

Вміст, %																
Fe _{заг.}	Ферозч.	FeO	Feмагн.	Fe ₂₊	Fe ₃₊	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P	P ₂ O ₅	MnO	S	CO ₂	п.п.п.
67,36	66,91	29,1	64,68	1,4	1,08	58,20	5,66	0,26	0,64	0,24	0,015	0,034	0,056	0,072	0,56	0,54
68,58	68,18	29,37	65,94	1,73	0,9	65,09	4,4	0,21	0,53	0,23	0,013	0,03	0,05	0,049	0,45	0,42

Таблиця 2

Гранулометричний склад концентрату (Fe_{заг.} 67,36%)

Класи крупності, мм	Вихід класу, %	Fe _{заг.} , %	SiO ₂ , %	Дані з накопичуванням		
				Вихід класу, %	Fe _{заг.} , %	SiO ₂ , %
+0,05	3,31	48,42	41,03	100	67,41	5,66
-0,05+0,04	3,70	59,62	16,47	96,69	68,06	4,45
-0,04+0,02	6,30	66,18	8,65	92,99	68,40	3,97
-0,02+0	86,69	68,56	3,63	86,69	68,56	3,63
Всього:	100,00	67,41	5,66	-	-	-

Таблиця 3

Типи зростання з урахуванням класів крупності у концентраті (Fe_{заг.} 67,36%)

Клас, мм	Співвідношення типів зростання / вміст рудного компоненту				
	Рудні	Багаті	Середні	Бідні	Нерудні
	95-100 р.ф.	75-95 р.ф.	25-75 р.ф.	5-25 р.ф.	0-5 р.ф.
+0,05	64	3	-	3	30
-0,05+0,04	69	13	3	5	10
-0,04+0,02	81	8	4	3	4
-0,02+0	89	3	3	2	3

Таблиця 4

Гранулометричний склад концентрату (Fe_{заг.} 68,58%)

Класи крупності, мм	Вихід класу, %	Fe _{заг.} , %	SiO ₂ , %	Дані з накопичуванням		
				Вихід класу, %	Fe _{заг.} , %	SiO ₂ , %
+0,05	3,27	49,3	32,24	100	68,58	4,37
-0,05+0,04	3,78	60,7	12,94	96,73	69,23	3,43
-0,04+0,02	6,21	66,5	5,69	92,95	69,58	3,04
-0,02+0	86,74	69,8	2,85	86,74	69,80	2,85
Всього:	100,00	68,58	4,4	-	-	-

Таблиця 5

Типи зростання з урахуванням класів крупності у концентраті (Fe_{заг.} 68,58%)

Клас, мм	Співвідношення типів зростання / вміст рудного компоненту				
	Рудні	Багаті	Середні	Бідні	Нерудні
	95-100 р.ф.	75-95 р.ф.	25-75 р.ф.	5-25 р.ф.	0-5 р.ф.
+0,05	66,0	4,0	0	5,0	25,0
-0,05+0,04	70,0	14,0	1,0	4,0	11,0
-0,04+0,02	82,0	9,0	2,0	3,0	4,0
-0,02+0	91,0	4,0	1,0	1,0	3,0

Таблиця 6

Результати досліджень

Навантаження, т/год	% тв.	Частота, Гц	Живлення			Надрешітний продукт			Підрешітний продукт		
			Вихід класу, %		Fe _{заг.} %	Вихід класу від операції, %		Fe _{заг.} %	Вихід класу від операції, %		Fe _{заг.} %
			+0,05	-0,05		+0,05	-0,05		+0,05	-0,05	
7,0	40,0	50	3,31	96,69	67,41	3,0	24,12	65,91	0,31	72,57	67,97
						3,0	22,26	65,74	0,31	74,43	67,98
						3,0	21,26	65,65	0,31	75,43	67,98
			3,27	96,73	68,58	2,98	14,44	65,87	0,29	82,29	69,15
						2,98	12,59	65,45	0,29	84,14	69,16
						2,98	11,59	65,2	0,29	85,14	69,16

(гранулометричний склад матеріалу, його густина і вологість, вміст і склад глинистих домішок);

– конструктивно-механічні фактори грохота (спосіб грохочення, рівномірність живлення, форма і розмір отворів просіюючої поверхні, кут нахилу короба, амплітуда і частота коливань) [14].

Доцільно в подальшому оцінити вплив кожного з цих факторів, а також можливість їх керування за допомогою чисельного, комп'ютерного моделювання та подальшої автоматизації процесу грохочення.

Чисельне моделювання визначає основу дослідження, включаючи методи оптимізації та обробки даних, тоді як комп'ютерне моделювання виступає інструментом реалізації цих методів, що забезпечує адаптацію моделей до реальних виробничих даних і можливість їх застосування в системах управління.

Так авторами [15] на основі підходу застосування управління класифікацією запропоновано узагальнений алгоритм оптимізації процесів збагачення. Представлено результати комп'ютерного моделювання процесу оптимізації класифікації на прикладі реальних показників збагачення магнетитових кварцитів. Підтверджено, що розроблені алгоритми та принципи управління можуть застосовуватися для визначення необхідних параметрів у сучасних інтелектуальних системах управління.

Відносно тонкого грохочення чисельне моделювання дозволить визначити функціональні залежності ефективності грохочення від технологічних параметрів без трудомістких промислових експериментів.

Комп'ютерне моделювання забезпечить реалізацію чисельних моделей у вигляді програмних алгоритмів, проведення обчислень за даними експериментів та аналіз отриманих результатів.

У підсумку чисельного та комп'ютерного моделювання можлива побудова алгоритмів автоматичного управління процесом грохочення.

Висновки. В результаті гранулометричного аналізу та мінералогічної оцінки встановлено, що у фракції -0,02 мм сконцентровано найбільший вміст Fe_{заг.} 68,56 % та 69,8 %, що підтверджується вмістом рудного компонента на рівні 89 % та 91 %.

Визначено, що застосування операції тонкого грохочення доцільно для доведення кінцевих концентратів. За рахунок впровадження тонкого грохочення очікується підвищення якості концентрату до 68-69%.

Доведено, що за рахунок високого виходу класу -0,05 мм на рівні 96,69-96,73 % тонке грохочення доцільно проводити з використанням ситової панелі з отвором сит -0,053 мм.

Сформовано напрямки подальших досліджень:

– проведення низки лабораторних експериментів з оцінкою факторів, що залежать від фізико-механічних властивостей вихідного матеріалу та конструктивно-механічних факторів грохоту;

– проведення чисельного моделювання з метою визначення функціональних залежностей ефективності грохочення від технологічних параметрів;

– комп'ютерне моделювання для забезпечення реалізації чисельних моделей у вигляді програмних алгоритмів;

– узагальнення результатів чисельного та комп'ютерного моделювання та подальша побудова алгоритмів автоматичного управління процесом грохочення з метою його оптимізації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Хміль І.В., Булах О.В., Костючик О.Л. Впровадження у технологію збагачення операції тонкого грохочення. *Гірничий вісник КНУ*. 2014. № 97. С. 226-231.
2. Хміль І.В., Булах О.В., Булах О.О. Тонке грохочення як перспективний метод підвищення ефективності збагачення магнетитових кварцитів. *Збагачення корисних копалин*. 2017. Вип. 67(108). С. 49-56.
3. Губін Г.В., Скляр Л.В., Ярош Т.П., Губін Г.Г. Аналітичний огляд напрямів покращення якості магнетитових концентратів. *Збагачення корисних копалин*. 2016. Вип. 64(105). С. 42-59.
4. Бровко А.І., Евсіович С.Г., Токталова І.Н. та ін. Промислові випробування тонкого грохочення концентрату на Дніпровському ГЗК. *Збагачення руд*. 1974. №4.
5. Albuquerque L.G., Wheeler J.E., Valine S.B. High frequency vibrating screens in closed grinding circuits. *Proceedings of the International Mineral Processing Congress «XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa»* (October 20-24, 2013). Goiânia, Brazil, 2013. P. 417–424.
6. Руди залізні та марганцеві. Методи відбирання проб : ДСТУ 3195:2015. [Чинний від 2016-04-01]. К.: Держстандарт України, 2016. 16 с. (Національні стандарти України).
7. Руди залізні. Методи відбирання та готування проб : ДСТУ ISO 3082:2018. [Чинний від 2019-12-01]. К.: Держстандарт України, 2019. 106 с. (Національні стандарти України).
8. Руди залізні та марганцеві. Методи готування проб : ДСТУ 3196:2015 [Чинний від 2016-04-01]. К.: Держстандарт України, 2016. 16 с. (Національні стандарти України).
9. Руди залізні, концентрати, агломерати, окатки та брикети. Загальні вимоги до методів хімічного аналізування : ДСТУ 8811.0:2019. [Чинний від 2020-07-01]. К.: Держстандарт України, 2020. 14 с. (Національні стандарти України).
10. Руди залізні, концентрати, агломерати, окатки та брикети. Метод визначення загального заліза : ДСТУ 8811.1:2018. [Чинний від 2019-01-01]. К.: Держстандарт України, 2019. 16 с. (Національні стандарти України).
11. Руди залізні. Визначення кремнію. Частина 1. Гравіметричні методи (ISO 2598-1:1992, IDT) : зі змінами (ІПС № 7-2006, № 1-3-2016) : ДСТУ ISO 2598-1:2003. [Чинний від 2008-07-01]. К.: Держстандарт України, 2008. 18 с. (Національні стандарти України).
12. Руди залізні та залізо прямого відновлювання. Визначення гранулометричного складу методом розсіювання : ДСТУ ISO 4701:2019. [Чинний від 2020-07-01]. К.: Держстандарт України, 2020. 20 с.
13. Бекеша С., Сливко Є., Білик Н. Методи мінералогічних досліджень. Львів.: Міністерство освіти і науки України, ЛНУ імені Івана Франка, 2013. 192 с.
14. Білецький В.С., Смирнов В.О. Технологія збагачення корисних копалин: підручник. Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. 612 с.
15. Kupin A., Zubov D., Osadchuk Y., Saiapin V. Algorithm and Model of Intelligent Classification for Optimizing the Parameters of Beneficiation Technology. *Proceedings of the 5th Workshop for Young Scientists in Computer Science and Software Engineering (CSSE@SW 2022)*, Kryvyi Rih, Ukraine, 2023. – P. 5–12.

REFERENCES:

1. Khmil, I.V., Bulakh, O.V., Kostyuchuk, O.L. (2014). Vprovadzhennia u tekhnolohiiu zbahachennia operatsii tonkoho hrokhochennia [Integration of fine screening into the beneficiation process]. *Hirnychy visnyk KNU – Mining Journal of Kryvyi Rih National University*, 97, 226-231 [in Ukrainian].
2. Khmil, I.V., Bulakh, O.V., Bulakh, O.O. (2017). Tonke hrokhochennia yak perspektyvnyi metod pidvyshchennia efektyvnosti zbahachennia mahnetytovykh kvartsytyv [Fine screening as a promising method for improving the efficiency of magnetite-quartzite beneficiation]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn – Mineral processing*, 67(108), 49-56. [in Ukrainian].

3. Hubin, H.V., Skliar, L.V., Yarosh, T.P., Hubin, H.H. (2016). Analitichnyi ohliad napriamiv pokrashchennia yakosti mahnetytovykh kontsentrativ [An Analytical Review of Approaches to Improving the Quality of Magnetite Concentrates]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn – Mineral processing*, 64(105), 42-59. [in Ukrainian].
4. Brovko, A.I., Evsiovykh, S.H., Toktalova, I.N. et al. (1974). Promyslovi vyprobuvannia tonkoho hrokhochennia kontsentratu na Dniprovskomu HZK [Pilot testing of fine screening of concentrate at the Dnipro Mining and Processing Plant]. *Zbahachennia rud – Ore beneficiation*, 4. [in Ukrainian].
5. Albuquerque, L.G., Wheeler, J.E., Valine, S.B. (2013). High frequency vibrating screens in closed grinding circuits. *Proceedings of the International Mineral Processing Congress «XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa»*. (pp. 417–424). Goiânia, Brazil. Goiânia, Brazil [in English].
6. Rudy zalizni ta marhantsevi. Metody vidbyrannia prob [Iron and manganese ores. Sampling methods]. (2016). *DSTU 3195:2015 from 01th April 2016*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
7. Rudy zalizni. Metody vidbyrannia ta hotuvannia prob [Iron ores. Methods for sampling and sample preparation]. (2019). *DSTU ISO 3082:2018 from 01th December 2019*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
8. Rudy zalizni ta marhantsevi. Metody hotuvannia prob [Iron and manganese ores. Sample preparation methods]. (2016). *DSTU 3196:2015 from 01th April 2016*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
9. Rudy zalizni, kontsentraty, ahlomeraty, okatky ta brykety. Zahalni vymohy do metodiv khimichnoho analizuvannia prob [Iron ore, concentrates, sinter, pellets, and briquettes. General requirements for chemical analysis methods]. (2020). *DSTU 8811.0:2019 from 01th July 2020*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
10. Rudy zalizni, kontsentraty, ahlomeraty, okatky ta brykety. Metod vyznachennia zahalnoho zaliza [Iron ore, concentrates, sinter, pellets, and briquettes. Method for determining total iron]. (2019). *DSTU 8811.1:2018 from 01th January 2019*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
11. Rudy zalizni. Vyznachennia kremniuu. Chastyna 1. Hravimetrychni metody (ISO 2598-1:1992, IDT) : zi zminamy (IPS № 7-2006, № 1-3-2016) [Iron ores. Determination of silicon. Part 1: Gravimetric methods (ISO 2598-1:1992, IDT) : with amendments (IPS No. 7-2006, No. 1-3-2016)]. (2008). *DSTU ISO 2598-1:2003 from 01th July 2008*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
12. Rudy zalizni ta zalizo priamoho vidnovliuvannia. Vyznachennia hranulometrychnoho skladu metodom rozsuiuvannia [Iron ores and direct-reduction iron. Determination of particle size distribution by the scattering method]. (2020). *DSTU ISO 4701:2019 from 01th July 2020*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
13. Bekesha, S., Slyvko, Ye., Bilyk, N. (2013). *Metody mineralohichnykh doslidzhen [Methods of mineralogical research]*. Lviv.: Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, LNU imeni Ivana Franka [in Ukrainian].
14. Biletskyi, V.S., Smyrnov, V.O. (2009). *Tekhnolohiia zbahachennia korysnykh kopalyn [Mineral processing technology]*. Donetsk: Skhidnyi vydavnychiy dim [in Ukrainian].
15. Kupin, A., Zubov, D., Osadchuk, Y., Saiapin, V. (2023). Algorithm and Model of Intelligent Classification for Optimizing the Parameters of Beneficiation Technology. *Proceedings of the 5th Workshop for Young Scientists in Computer Science and Software Engineering (CSSE@SW 2022)*. (pp. 5–12). Kryvyi Rih, Ukraine.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 06.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 528.48:551.435.62

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-27>

ОЦІНКА МІНІМАЛЬНО ВИЯВЛЮВАНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗСУВНИХ СХИЛІВ ЗА ДАНИМИ БАГАТОРАЗОВОГО НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

Мітченко Дмитро Володимирович,

аспірант

Криворізького національного університету;

Головний маркшейдер

ПРАТ «ПІВНІЧНИЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ»

ORCID ID: 0009-0000-4647-906X

У статті розглянуто проблему достовірного виявлення деформацій зсувних схилів за даними багаторазового наземного лазерного сканування (TLS). Незважаючи на високу точність сучасних геодезичних технологій, інтерпретація малих різниць між тривимірними геометричними моделями рельєфу ускладнюється впливом низки похибок, а саме: безпосередньо вимірювань; суміщення різночасових хмар точок, отриманих під час лазерного сканування; геодезичної прив'язки. Перелічені похибки можуть призводити до хибних висновків щодо реальних деформацій зсувних схилів. Метою дослідження є розробка методики оцінки мінімально виявлюваних деформацій (Limit of Detection, LoD) з урахуванням впливу основних джерел похибок у TLS-моніторингу. Методика дослідження базується на інтеграції TLS-даних, отриманих за результатами неодноразових GNSS-вимірювань, та аналізі похибок на етапах збору, обробки та суміщення просторових даних. Для оцінки достовірності виявлених змін використано статистичний підхід, що враховує точність лазерного сканування, похибки реєстрації хмар точок та геодезичної прив'язки. Запропоновано формалізований критерій визначення порогу виявлення деформацій, який дозволяє відокремлювати реальні зміщення від шумів вимірювань. У роботі проаналізовано вплив геометрії поверхні сканування, цільності хмар точок та умов знімання на величину мінімально виявлюваних деформацій. Встановлено, що нерівномірність покриття поверхні, наявність зон тінювання та складна морфологія рельєфу істотно підвищують рівень невизначеності, що безпосередньо впливає на точність визначення змін деформацій зсувних схилів. Обґрунтовано необхідність оптимізації конфігурації станцій сканування та параметрів знімання для підвищення достовірності результатів. У результаті дослідження встановлено, що мінімально виявлювані величини деформацій залежать від умов знімання, геометрії сканування та якості інтеграції даних і можуть перевищувати номінальну точність окремих методів. Практичне застосування (запропонованого підходу) виконаних досліджень дозволяє підвищити достовірність інтерпретації результатів моніторингу, зменшити ризик помилкових висновків та оптимізувати процес виконання польових робіт. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем геодезичного моніторингу зсувних процесів, а також при розробці методик оцінки та раннього попередження геодинамічних ризиків.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, зсувні процеси, мінімально виявлювана деформація, багаточасовий моніторинг, хмара точок.

Mitchenko Dmytro. Assessment of minimally detectable deformations of landslide slopes based on multi-temporal terrestrial laser scanning data

This paper addresses the problem of reliable detection of landslide slope deformations based on multi-temporal terrestrial laser scanning (TLS) data. Despite the high accuracy of modern geodetic technologies, the interpretation of differences between three-dimensional terrain models is often complicated by measurement errors, point cloud registration inaccuracies, and georeferencing uncertainties, which may lead to misinterpretation of changes as real deformations. The aim of the study is to develop an approach for assessing minimally detectable deformations (Limit of Detection, LoD), taking into account the main sources of uncertainty in TLS-based monitoring. The research methodology is based on the integration of multi-temporal TLS data with GNSS measurements and the analysis of errors at the stages of data acquisition, processing, and spatial data alignment. A statistical approach is applied to assess the reliability of detected changes, considering the accuracy of laser scanning, point cloud registration errors, and geodetic referencing uncertainties. A formalized criterion for determining the deformation detection threshold is proposed, allowing real displacements to be distinguished from measurement noise. Additionally, the influence of scanning geometry, point cloud density, and acquisition conditions on the magnitude of minimally detectable deformations is analyzed. It is established that uneven surface coverage, shadow zones, and complex terrain morphology can significantly increase uncertainty, directly affecting the accuracy of deformation detection. The necessity of optimizing scanning station configuration and acquisition parameters to reduce errors and improve result reliability is substantiated. The study demonstrates that minimally detectable deformations depend on acquisition conditions, scanning geometry, and data integration quality, and may exceed the nominal accuracy of individual methods. The practical application of the proposed approach enhances the reliability of monitoring result interpretation, reduces the risk of erroneous conclusions, and allows optimization of field survey parameters. The obtained results can be used to improve geodetic monitoring systems for landslide processes, as well as for the development of early warning methodologies and geodynamic risk assessment.

Key words: terrestrial laser scanning, landslide processes, minimally detectable deformation, multi-temporal monitoring, point cloud.

Вступ. Процеси зсуву належать до найбільш небезпечних геодинамічних явищ, що призводять до деформацій рельєфу, порушення стійкості схилів, руйнування інженерних об'єктів та створюють загрозу для безпеки територій. Для своєчасного виявлення таких змін необхідні методи моніторингу, здатні фіксувати просторові деформації з високою точністю та у часовій динаміці. Серед сучасних підходів важливе місце займають GNSS-технології, які широко застосовуються для моніторингу зсувів у реальному часі та забезпечують отримання координатних даних для оцінки зміщень схилів [6].

Поряд із супутниковими спостереженнями, наземне лазерне сканування (TLS) є одним із найбільш інформативних засобів дослідження деформаційних процесів, оскільки дозволяє формувати високодеталізовані тривимірні моделі поверхні. Його перевага полягає у високій щільності хмари точок, можливості багаторазового повторення зйомок та детальній фіксації морфологічних особливостей об'єкта. Застосування лазерних сканерів для високороздільного моніторингу зсувів продемонстровано у роботі, де деформації аналізувалися за допомогою feature tracking та гістограмного аналізу, що підтвердило ефективність TLS для просторового відстеження змін нестійких масивів [5].

Сучасні дослідження свідчать, що багаторазові лазерні сканування та інші дистанційні дані є ефективним інструментом кількісної оцінки геоморфодинаміки схилів. Зокрема, багаторазове наземне лазерне сканування використовується для дослідження складних ерозійних форм, де важливим є не лише факт отримання тривимірної моделі, а й оптимізація схеми зйомки, що безпосередньо впливає на повноту покриття та якість подальшого аналізу змін [3]. Аналогічно, використання мультитимчасових даних наземного LiDAR у поєднанні з наземними фотографіями та вебкамерними спостереженнями дозволяє кількісно оцінювати геоморфодинаміку схилів у складних природних умовах [10].

Важливою перевагою дистанційних методів є можливість фіксації змін у різних типах нестабільних рельєфних систем. Це підтверджується дослідженнями активних геоморфологічних процесів на прибережних урвищах, де дистанційні методи використовувалися для аналізу сучасної морфодинаміки схилових форм [4], а також роботами, у яких близькодіапазонні методи зондування дали змогу простежити кінематику та геоморфологічні зміни дестабілізованого скельного льодовика [8]. Хоча наведені об'єкти відрізняються за генезисом від класичних зсувів, ці дослідження підтверджують

загальну ефективність багаторазових тривимірних спостережень для аналізу змін нестійких поверхонь.

Разом із тим, отримання детальних тривимірних моделей саме по собі не розв'язує проблему достовірного виявлення деформацій. Порівняння поверхонь, побудованих у різні моменти часу, може відображати як реальні геоморфологічні зміни, так і вплив похибок вимірювань, умов зйомки, геометрії сканування, дальності до об'єкта, а також помилок суміщення хмар точок. Методичне значення має оцінка невизначеності TLS-даних, що показано на прикладі постійної довгобазової системи лазерного сканування, де спеціально аналізувався вплив похибок на кількісне визначення змін поверхні [9].

Таким чином, для задач моніторингу зсувних схилів особливо важливим є не лише виявлення різниці між моделями, отриманими у різні проміжки часу, а й встановлення того, чи є ця різниця статистично та методично достовірною. Це зумовлює необхідність переходу від простого порівняння моделей до оцінки мінімально виявлюваних деформацій, тобто такого порогу змін, який перевищує сумарну невизначеність вимірювань. Особливо актуальною ця проблема є для інженерно-геодезичного моніторингу зсувів, де навіть невеликі зміщення можуть бути діагностично значущими.

Отже, аналіз сучасних досліджень показує, що TLS і GNSS є ефективними інструментами для спостереження за нестійкими схилами, однак питання достовірного розмежування реальних деформацій і шумів вимірювань залишається недостатньо опрацьованим. У зв'язку з цим метою даної роботи є оцінка мінімально виявлюваних деформацій зсувних схилів за багаторазовими даними наземного лазерного сканування з урахуванням основних джерел похибок, що виникають на етапах знімання, суміщення та інтерпретації просторових даних.

Матеріали та методи. Дослідження виконано на ділянці нестійкого борту Першотравневого кар'єру в межах м. Кривий Ріг. Вибір цього об'єкта зумовлений наявністю техногенно порушеного рельєфу, складною геометрією уступів, локальними зонами розущільнення масиву та візуальними ознаками деформаційних процесів. Для даної території характерні тріщини, уступоподібні форми, просадки та окремі ділянки перерозподілу гірничої маси, що дає можливість апробувати підхід до оцінки мінімально виявлюваних деформацій у реальних умовах.

Основу вихідних даних становили результати неодноразового наземного лазерного сканування, доповнені геодезичною прив'язкою

контрольних точок за GNSS-вимірюваннями. Для лазерного знімання застосовувався сканер Leica RTC360, який забезпечує високу щільність хмари точок і дозволяє відтворювати складну морфологію схилу у тривимірному вигляді. Координатне забезпечення виконувалося за допомогою Leica GS18T. У випадках, коли супутникові вимірювання могли ускладнюватися затіненням, наявністю конструкцій або несприятливою конфігурацією огляду неба, для контрольної перевірки окремих пунктів допускався тахеометричний контроль із використанням Topcon ES-105.

Польовий етап складався з кількох послідовних операцій. Насамперед проводилася рекогносцировка території, у ході якої визначалися межі ділянки спостережень, оцінювалася доступність окремих фрагментів схилу та підбиралися місця встановлення опорних і контрольних точок. Окрему увагу приділяли вибору стабільних зон за межами активної деформації, оскільки саме вони використовувалися як базові елементи для подальшої геодезичної прив'язки та контролю просторової незмінності моделей різних циклів спостережень.

Після цього формувалася мережа контрольних точок. Їх координати визначалися GNSS-методом у режимі, що забезпечував потрібну точність для геоприв'язки результатів TLS-зйомки. Контрольні точки розміщувалися таким чином, щоб охопити як стабільну частину полігону, так і прилеглі до нестійкої зони ділянки. Такий підхід давав змогу не лише задати єдину систему координат для всіх епох спостережень,

а й надалі оцінювати просторове зміщення моделей відносно опорної основи.

Наземне лазерне сканування виконувалося з кількох станцій. Їхнє розташування підбиралося з урахуванням рельєфу, наявності перекриття між сусідніми сканами та мінімізації зон тінювання. Кількість позицій визначалася конфігурацією схилу: чим складнішою була геометрія уступів і чим більше локальних нерівностей містила поверхня, тим більшої кількості станцій потребувало знімання. Для підвищення точності взаємної реєстрації використовувалися сферичні мішені або інші стабільні орієнтири, що чітко розпізнавалися у сусідніх сканах. Усі цикли багаторазових спостережень намагалися виконувати за максимально подібної схеми розміщення сканера, щоб зменшити вплив відмінностей геометрії знімання на результати порівняння.

Камеральна обробка даних починалася з опрацювання GNSS-спостережень у програмному середовищі Leica Infinity, де перевірялися координати опорних пунктів і виконувалося їх узгодження в єдиній системі. Паралельно скани кожної епохи реєструвалися в Cyclone REGISTER 360. На цьому етапі здійснювалися зшивання окремих позицій, попередня фільтрація шуму, відсікання випадкових відбиттів і перевірка якості перекриття між станціями. У результаті для кожного циклу спостережень формувалася зведена хмара точок, що відображала реальний стан поверхні на момент знімання.

Після реєстрації кожна окрема хмара точок приводилася до спільної системи координат

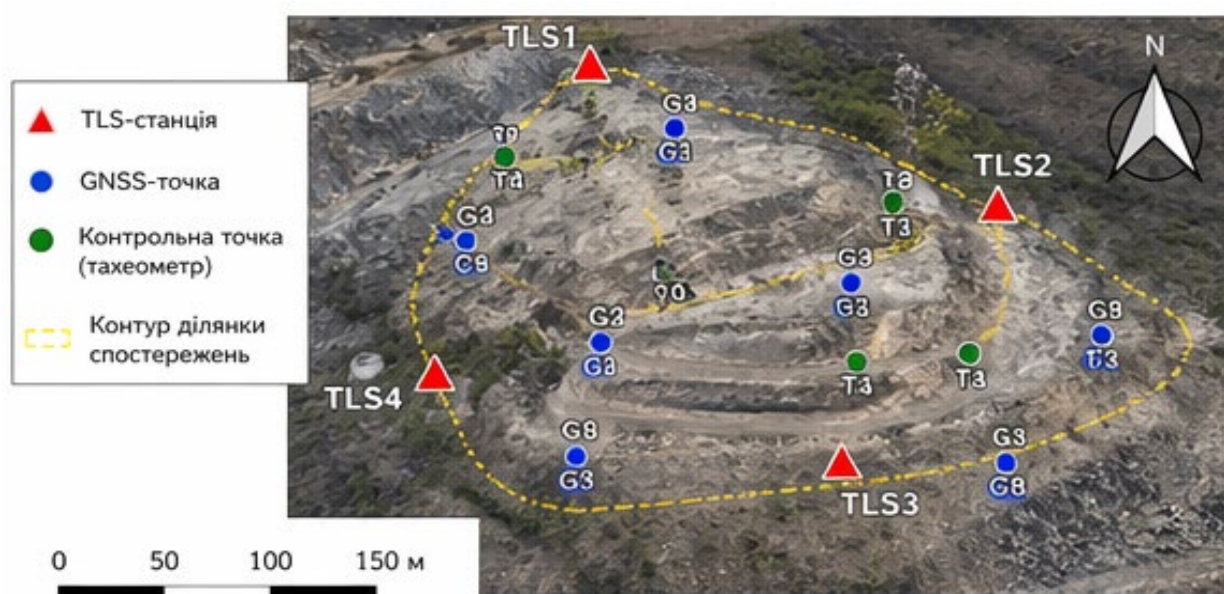


Рис. 1. Схема розташування TLS-станцій та контрольних GNSS-точок

на основі контрольних пунктів. Далі виконувалося уточнювальне суміщення моделей у CloudCompare із застосуванням алгоритму ICP (Iterative Closest Point). Використання цього алгоритму дозволяло зменшити залишкові взаємні зміщення між хмарами точок і забезпечити коректне порівняння поверхонь різних епох. Якість суміщення оцінювали за залишками на контрольних точках і значенням середньоквадратичної похибки реєстрації. Для подальшого аналізу допускалися лише ті пари моделей, для яких досягався прийнятний рівень просторового узгодження.

Після завершення геоприв'язки та суміщення виконувалося безпосереднє порівняння циклічних хмар точок. Для цього обиралися або повні моделі поверхні, або окремі ділянки підвищеного інтересу: зони тріщиноутворення, локальні тераси, просадки, уступи та фрагменти, де візуально фіксувалися ознаки нестабільності. Визначення змін проводилося шляхом обчислення просторових відстаней між поверхнями двох сусідніх епох спостережень. Отримані значення трактувалися не як автоматично достовірні деформації, а як потенційні зміни, що потребують перевірки з урахуванням сумарної похибки всієї виміральної схеми.

Для цього в дослідженні застосовано підхід оцінки мінімально виявлюваної деформації. Його суть полягає у визначенні такого порогу зміни поверхні, який перевищує сукупну невизначеність, що виникає на всіх етапах роботи – від польового знімання до обчислення різниць між моделями. До складових цієї невизначеності віднесено: власну похибку лазерного сканування, похибку взаємної реєстрації сканів, похибку суміщення хмар точок та похибку геодезичної прив'язки контрольних точок. Узагальнений поріг мінімально виявлюваної деформації визначали за формулою:

$$LoD = \pm 1,96 \cdot \sqrt{\sigma_{TLS}^2 + \sigma_{reg}^2 + \sigma_{GNSS}^2}$$

де

σ_{TLS} – похибка, пов'язана з точністю лазерного сканування;

σ_{reg} – похибка суміщення і реєстрації хмар точок;

σ_{GNSS} – похибка геодезичної прив'язки;

1,96 – коефіцієнт для довірчої ймовірності 95 %.

Інтерпретація результатів виконувалася за таким принципом: якщо абсолютна різниця між поверхнями перевищувала значення LoD , зміна вважалася достовірною деформацією; якщо ж вона не досягала цього порогу, її відносили до зони невизначеності. Такий підхід дозволив уникнути помилкового трактування локальних відхилень, які можуть бути наслідком

не реального зміщення масиву, а особливостей геометрії знімання, неоднорідної щільності точок або залишкових похибок суміщення.

Для підвищення надійності висновків результати багаторазового TLS-порівняння зіставлялися з польовими спостереженнями та геодезичними даними контрольних точок. Особлива увага приділялася ділянкам, де зміни за моделями перевищували поріг мінімально виявлюваної деформації та одночасно підтверджувалися морфологічними ознаками активізації процесу. Це забезпечило перехід від простого фіксування різниці між моделями до обґрунтованого виділення реально значущих деформацій зсувного схилу.

Результати. Першим результатом дослідження стало формування узгоджених різночасових тривимірних моделей нестійкої ділянки борту Першотравневого кар'єру. Після реєстрації сканів, геодезичної прив'язки та просторового суміщення отримано цифрове представлення схилу, придатне для часових порівнянь. Модель відобразила геометрію техногенного масиву як багатоярусної системи з горизонтами +115, +130, +145, +160 та +175 м. Загальна висота утворення становить близько 60 м; центральна частина схилу характеризується значними кутами нахилу, тоді як південний борт має пологішу конфігурацію і в межах спостережень не виявив виражених ознак активізації.

Другий блок результатів стосується якості просторових даних. Наземне лазерне сканування забезпечило високу деталізацію поверхні: на локальних ділянках щільність хмари точок становила 5 000–10 000 т/м², що дало змогу впевнено виділяти дрібні морфологічні елементи схилу. Під час просторового узгодження моделей встановлено, що середньоквадратична похибка інтеграції перебуває в межах 2,5–3,5 см. Саме це значення задає нижню межу, нижче якої виявлені зміни не можуть автоматично трактуватися як реальні деформації.

Порівняння різночасових моделей показало, що деформації розподілені по схилу нерівномірно. Найбільш виразні зміни зосереджені в локальній зоні, пов'язаній із районом воронки №1 на горизонті +150 м. Тут зафіксовано поєднання кількох ознак нестійкості: тріщиноутворення, просідання, формування терасоподібних уступів і локальних розривів поверхні. Просторове положення цих форм свідчить про розвиток деформацій у напрямку балки Грядковата. Натомість периферійні частини схилу не продемонстрували такої концентрації змін, а окремі різниці між моделями там здебільшого не виходили за межі очікуваної невизначеності.

Кількісне підтвердження активізації отримано за результатами геодезичних спостережень на контрольованих ділянках автодоріг Б і В. Зафіксоване розкриття тріщин досягало 55 мм у плані та 82 мм за глибиною. На відміну від локальних сантиметрових відхилень, які можуть бути пов'язані з похибками суміщення або нерівномірністю знімання, ці значення мають інженерно значущий характер і свідчать про фактичний розвиток деформаційного процесу. Отже, саме на цих ділянках різниця між станами поверхні перевищує рівень фонові невизначеності та може розглядатися як достовірна ознака нестійкості.

Окремо проаналізовано вплив геодезичної прив'язки на достовірність інтерпретації. Порівняння GNSS-визначень із тахеометричним контролем показало, що для GNSS похибка у площині змінювалася від -42 до +62 мм, а за висотою – від -27 до +43 мм. Для тахеометричних вимірювань відповідні відхилення були меншими: від -14 до +11 мм у площині та від -11 до +16 мм за висотою. Це свідчить, що при аналізі малих змін саме геодезична складова може істотно впливати на межу достовірного виявлення деформацій. Частина змін сантиметрового рівня не може бути інтерпретована без урахування похибки прив'язки, особливо у складних умовах кар'єру.

Узагальнення результатів дозволяє виділити дві групи змін. До першої належать зміни, що перевищують сумарний рівень похибок і супроводжуються морфологічними ознаками нестійкості; вони інтерпретуються як достовірні деформації. До другої належать локальні

відмінності між різночасовими моделями, які виникають у межах очікуваної невизначеності й не мають чіткого польового підтвердження; такі зміни слід відносити до зони недостовірного виявлення. Практично це означає, що сама наявність різниці між двома хмарами точок ще не є достатньою підставою для висновку про активізацію зсувного процесу.

Отже, достовірне виявлення деформацій у межах техногенного схилу визначається не лише деталізацією TLS-знімання, а сукупною дією трьох чинників: якості просторового суміщення моделей, точності геодезичної прив'язки та морфологічної виразності самих змін. Найбільш надійно фіксуються деформації, які одночасно перевищують рівень похибок, просторово концентруються в межах нестійких зон і підтверджуються незалежними геодезичними або польовими спостереженнями. Саме такий підхід формує підставу для подальшої оцінки мінімально виявлюваних деформацій як критерію відокремлення реальних змін від шуму вимірювань.

Обговорення. Отримані результати підтвердили, що при аналізі багаторазових TLS-даних ключовим є не саме фіксування різниці між поверхнями, а встановлення межі, після якої така різниця може розглядатися як достовірна деформація. Цей висновок добре узгоджується з підходом, у якому запропоновано метод обчислення detectable landslide за даними наземного лазерного сканування, тобто фактично здійснено перехід від простого вимірювання змін до оцінки порога їх виявлення [2]. У нашому дослідженні аналогічна логіка реалізована через

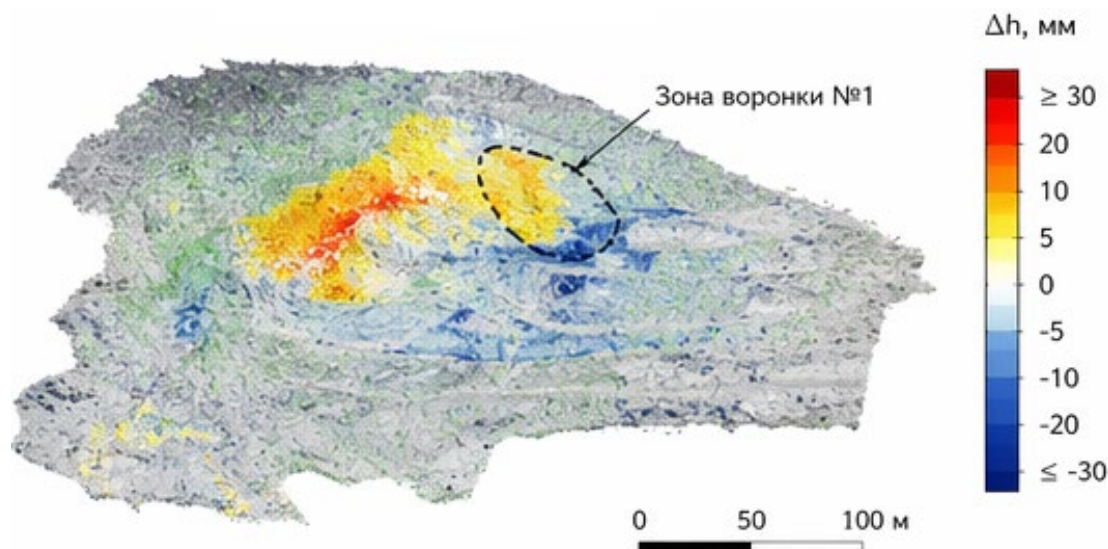


Рис. 2. Карта різниці між моделями

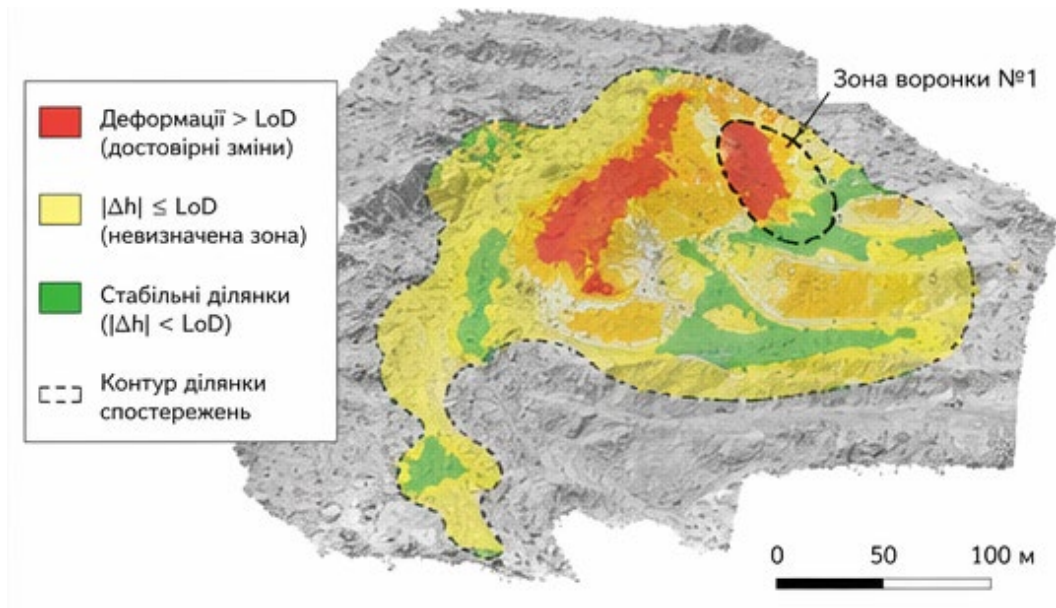


Рис. 3. Зони достовірних деформацій та невизначеності

використання мінімально виявлюваної деформації як критерію відокремлення реальних зміщень від шуму вимірювань.

Водночас результати показали, що достовірність виявлених змін значною мірою залежить від якості підготовки та обробки вихідних даних. Це узгоджується з дослідженням, у якому TLS-моніторинг деформацій схилу розглядається як ефективний спосіб отримання дискретних тривимірних даних поверхні, а окрема увага приділяється процедурам реєстрації хмар точок [12]. Для нашої роботи це має принципове значення, оскільки навіть за наявності щільної хмари точок похибки просторового суміщення здатні суттєво впливати на інтерпретацію малих змін і, відповідно, на величину порога достовірного виявлення деформацій.

Суттєвим є й те, що рівень невизначеності у TLS-завданнях не є сталою величиною, а змінюється залежно від геометрії сканування та властивостей поверхні. Це прямо підтверджено у праці, де показано, що оцінка Level of Detection повинна враховувати похибку дальномірної складової та вплив таких чинників, як відстань до об'єкта, кут падіння променя, інтенсивність відбиття й матеріал поверхні [11]. У нашому випадку саме ці фактори пояснюють, чому частина локальних відмінностей між епохами не може трактуватися як деформація без додаткової перевірки, особливо на ділянках зі складною морфологією, затіненням та нерівномірним покриттям.

Наші результати також узгоджуються із загальними висновками огляду TLS-технологій

для моніторингу деформацій в інженерних задачах, у якому багаторазове порівняння хмар точок визначено як базову схему аналізу, а серед головних умов надійного виявлення деформацій названо планування вимірювань, точну реєстрацію, геоприв'язку та вибір адекватного способу change detection [7]. Для досліджуваного техногенного схилу це важливо, оскільки достовірність підсумкового результату формується не лише точністю сканера, а всією вимірювально-аналітичною схемою – від вибору станцій до контролю якості суміщення моделей, отриманих у різні проміжки часу.

Окремо слід відзначити, що вибір способу аналізу деформацій впливає на характер отриманої інформації. У дослідженні, присвяченому порівнянню методів виявлення деформацій за TLS- та UAS-даними, показано, що point cloud-based methods є придатними для виявлення площинно розподілених змін поверхні, тоді як feature-based та image-based підходи краще працюють для локальних переміщень окремих елементів [1]. У цьому контексті обраний у нашій роботі підхід можна вважати виправданим: основний акцент зроблено на виявленні просторово розподілених змін поверхні схилу за багаторазовими TLS-моделями, а польові та геодезичні спостереження використано як засіб локальної верифікації найбільш значущих зон деформації.

Таким чином, обговорення отриманих результатів свідчить, що для задач моніторингу зсувних схилів недостатньо лише високої деталізації хмари точок. Практичну цінність мають

лише ті зміни, які перевищують сумарний рівень невизначеності, підтверджуються просторовою структурою деформаційних форм і не суперечать даним геодезичного контролю. Саме тому оцінка мінімально виявлюваної деформації повинна розглядатися не як допоміжний елемент, а як центральний критерій інтерпретації багаторазових TLS-спостережень.

Висновки. У статті розроблено підхід до оцінки мінімально виявлюваних деформацій зсувних схилів за неодноразовими даними наземного лазерного сканування з урахуванням похибок геодезичної прив'язки, суміщення хмар точок та умов знімання. Запропонований підхід дає змогу перейти від формального порівняння різночасових моделей поверхні до обґрунтованого виділення лише тих змін, які можуть вважатися достовірними деформаціями.

За результатами дослідження встановлено, що висока щільність і деталізація TLS-даних самі по собі не гарантують надійного виявлення малих зміщень. Достовірність інтерпретації визначається сукупною дією кількох чинників: точністю геодезичної прив'язки, якістю просторового суміщення моделей, геометрією сканування, наявністю зон тінювання та морфологічними особливостями досліджуваної поверхні.

У зв'язку з цим мінімально виявлювана деформація повинна розглядатися як основний критерій оцінки значущості змін, а не як допоміжний параметр камеральної обробки.

Проведений аналіз показав, що в межах досліджуваної ділянки нестійкого борту найбільш достовірні деформації приурочені до зон тріщиноутворення, просідань та локального порушення суцільності поверхні. Саме на цих ділянках зафіксовані зміни перевищували рівень фонові невизначеності та узгоджувалися з геодезичними спостереженнями. Водночас частина локальних відмінностей між багаторазовими моделями виявилася співмірною з похибками вимірювальної схеми, а тому не може трактуватися як підтверджена деформація без додаткової перевірки.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропонована методика дозволяє підвищити достовірність геодезичного моніторингу зсувних процесів, зменшити ризик хибної інтерпретації малих змін та оптимізувати параметри польових спостережень. Її використання є доцільним під час контролю стану техногенних схилів, у системах раннього виявлення деформацій та при оцінці геодинамічних ризиків у гірничопромислових районах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Becker D., Raddatz L., Roussel C., Klonowski J. Analysis methods for deformation detection using TLS and UAS data on the example of a landslide simulation. *International Journal of Geo-Engineering*. 2024. Vol. 15. P. 9. DOI: 10.1186/s40703-023-00203-z.
2. Chen X., Ban Y., Hua X., Lu T., Tao W., An Q. A method for the calculation of Detectable Landslide using Terrestrial Laser Scanning data. *Measurement*. 2020. Vol. 160. P. 107852. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107852.
3. Domazetović F., Šiljeg A., Marić I., Panda L. A New Systematic Framework for Optimization of Multi-Temporal Terrestrial LiDAR Surveys over Complex Gully Morphology. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 14. P. 3366. DOI: 10.3390/rs14143366.
4. Domínguez-Cuesta M.J., Rodríguez-Rodríguez L., López-Fernández C., Pando L., Cuervas-Mons J., Olona J., González-Pumariega P., Serrano J., Valenzuela P., Jiménez-Sánchez M. Using Remote Sensing Methods to Study Active Geomorphologic Processes on Cantabrian Coastal Cliffs. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 20. P. 5139. DOI: 10.3390/rs14205139.
5. Hosseini K., Reindl L., Raffl L., Wiedemann W., Holst C. 3D Landslide Monitoring in High Spatial Resolution by Feature Tracking and Histogram Analyses Using Laser Scanners. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 1. P. 138. DOI: 10.3390/rs16010138.
6. Huang G., Du S., Wang D. GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review. *Satellite Navigation*. 2023. Vol. 4. P. 5. DOI: 10.1186/s43020-023-00095-5.
7. Shen N., Wang B., Ma H., Zhao X., Zhou Y., Zhang Z., Xu J. A review of terrestrial laser scanning (TLS)-based technologies for deformation monitoring in engineering. *Measurement*. 2023. Vol. 223. P. 113684. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113684.
8. Vivero S., Lambiel C., Delaloye R. et al. Kinematics and geomorphological changes of a destabilising rock glacier captured from close-range sensing techniques (Tsarine rock glacier, Western Swiss Alps). *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. P. 1017949. DOI: 10.3389/feart.2022.1017949.
9. Voordendag A., Goger B., Klug C., Prinz R., Rutzinger M., Sauter T., Kaser G. Uncertainty assessment of a permanent long-range terrestrial laser scanning system for the quantification of snow dynamics on Hintereisferner (Austria). *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 11. P. 1085416. DOI: 10.3389/feart.2023.1085416.

10. Wegner K., Durand V., Villeneuve N., Mangeney A., Kowalski P., Peltier A., Stark M., Becht M., Haas F. Multitemporal Quantification of the Geomorphodynamics on a Slope within the Cratère Dolomieu at the Piton de la Fournaise (La Réunion, Indian Ocean) Using Terrestrial LiDAR Data, Terrestrial Photographs, and Webcam Data. *Geosciences*. 2024. Vol. 14, No. 10. P. 259. DOI: 10.3390/geosciences14100259.
11. Winiwarter L., Anders K., Wujanz D., Höfle B. Influence of ranging uncertainty of terrestrial laser scanning on change detection in topographic 3D point clouds. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2020. Vol. V-2-2020. P. 789–796. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-2-2020-789-2020.
12. Yin C., Li H., Hu Z., Li Y. Application of the Terrestrial Laser Scanning in Slope Deformation Monitoring: Taking a Highway Slope as an Example. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 8. P. 2808. DOI: 10.3390/app10082808.

REFERENCES:

1. Becker, D., Raddatz, L., Roussel, C., & Klonowski, J. (2024). Analysis methods for deformation detection using TLS and UAS data on the example of a landslide simulation. *International Journal of Geo-Engineering*, 15, Article 9. <https://doi.org/10.1186/s40703-023-00203-z>
2. Chen, X., Ban, Y., Hua, X., Lu, T., Tao, W., & An, Q. (2020). A method for the calculation of detectable landslide using terrestrial laser scanning data. *Measurement*, 160, Article 107852. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107852>
3. Domazetović, F., Šiljeg, A., Marić, I., & Pandra, L. (2022). A new systematic framework for optimization of multi-temporal terrestrial LiDAR surveys over complex gully morphology. *Remote Sensing*, 14(14), Article 3366. <https://doi.org/10.3390/rs14143366>
4. Domínguez-Cuesta, M. J., Rodríguez-Rodríguez, L., López-Fernández, C., Pando, L., Cuervas-Mons, J., Olona, J., González-Pumariega, P., Serrano, J., Valenzuela, P., & Jiménez-Sánchez, M. (2022). Using remote sensing methods to study active geomorphologic processes on Cantabrian coastal cliffs. *Remote Sensing*, 14(20), Article 5139. <https://doi.org/10.3390/rs14205139>
5. Hosseini, K., Reindl, L., Raffl, L., Wiedemann, W., & Holst, C. (2024). 3D landslide monitoring in high spatial resolution by feature tracking and histogram analyses using laser scanners. *Remote Sensing*, 16(1), Article 138. <https://doi.org/10.3390/rs16010138>
6. Huang, G., Du, S., & Wang, D. (2023). GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: A review. *Satellite Navigation*, 4, Article 5. <https://doi.org/10.1186/s43020-023-00095-5>
7. Shen, N., Wang, B., Ma, H., Zhao, X., Zhou, Y., Zhang, Z., & Xu, J. (2023). A review of terrestrial laser scanning (TLS)-based technologies for deformation monitoring in engineering. *Measurement*, 223, Article 113684. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113684>
8. Vivero, S., Hendrickx, H., Frankl, A., Delaloye, R., & Lambiel, C. (2022). Kinematics and geomorphological changes of a destabilising rock glacier captured from close-range sensing techniques (Tsarmine rock glacier, Western Swiss Alps). *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 1017949. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1017949>
9. Voordendag, A., Goger, B., Klug, C., Prinz, R., Rutzinger, M., Sauter, T., & Kaser, G. (2023). Uncertainty assessment of a permanent long-range terrestrial laser scanning system for the quantification of snow dynamics on Hintereisferner (Austria). *Frontiers in Earth Science*, 11, Article 1085416. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1085416>
10. Wegner, K., Durand, V., Villeneuve, N., Mangeney, A., Kowalski, P., Peltier, A., Stark, M., Becht, M., & Haas, F. (2024). Multitemporal quantification of the geomorphodynamics on a slope within the Cratère Dolomieu at the Piton de la Fournaise (La Réunion, Indian Ocean) using terrestrial LiDAR data, terrestrial photographs, and webcam data. *Geosciences*, 14(10), Article 259. <https://doi.org/10.3390/geosciences14100259>
11. Winiwarter, L., Anders, K., Wujanz, D., & Höfle, B. (2020). Influence of ranging uncertainty of terrestrial laser scanning on change detection in topographic 3D point clouds. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-2-2020, 789–796. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-789-2020>
12. Yin, C., Li, H., Hu, Z., & Li, Y. (2020). Application of the terrestrial laser scanning in slope deformation monitoring: Taking a highway slope as an example. *Applied Sciences*, 10(8), Article 2808. <https://doi.org/10.3390/app10082808>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 07.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 622.73:553.31

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-28>

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО ПОДРІБНЕННЯ МАГНЕТИТОВИХ КВАРЦИТІВ

Олійник Тетяна Анатоліївна,

доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедрою збагачення корисних копалин та хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-0315-7308

Гапоненко Роман Костянтинович,

аспірант кафедри збагачення корисних копалин та хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0009-0003-5057-1442

У статті проведено систематизований аналіз сучасних наукових досліджень у галузі подрібнення магнетитових кварцитів – одного з найбільш енергоємних процесів у циклі збагачення залізних руд. Розглянуто п'ять ключових напрямів: технологічний, мінералогічний, магнітомінералогічний, математично-модельний та екологічний. Встановлено, що застосування валків високого тиску (HPGR) у замкненому циклі з віброгрохотом забезпечує вищий ступінь розкриття рудних зерен при нижчих питомих витратах електроенергії порівняно з традиційним кульовим подрібненням. Показано, що тривале подрібнення супроводжується деградацією магнітних властивостей магнетиту внаслідок порушення доменної структури та часткового окиснення з утворенням маггеміту і гематиту. З позицій наноструктурного підходу обґрунтовано, що зазначена деградація є закономірним наслідком переходу мінеральних зерен у нанодіапазон (1–100 нм) при надмірному механічному диспергуванні. Введено в науковий обіг концепцію вибухової підготовки руди як наноструктурно орієнтованого методу попереднього диспергування – зокрема, метод удосконаленого каналного бойовика (УКБ), захищений патентами України. Доведено, що підвищення інтенсивності вибухового імпульсу в 40 разів порівняно зі стандартним підриванням забезпечує попереднє мікротріщиноутворення по межах зростання зерен магнетиту і кварцу ще на стадії кар'єрних робіт, що дозволяє скоротити тривалість наступного млинового подрібнення, зберегти магнітні властивості рудного мінералу та зменшити екологічне навантаження на хвостосховища.

Ключові слова: магнетитові кварцити, подрібнення, валки високого тиску, магнітні властивості, наноструктурний підхід, вибухова підготовка руди, удосконалений каналний бойовик, рудопідготовка.

Oliinyk Tetiana, Haponenko Roman. Analysis of modern scientific research on practical application of approaches to grinding magnetite quartzites

The article presents a systematic analysis of modern scientific research in the field of grinding magnetite quartzites – one of the most energy-intensive processes in the iron ore beneficiation cycle. Five key directions are considered: technological, mineralogical, magnetomineralogical, mathematical-modeling, and ecological. It is established that the use of high-pressure grinding rolls (HPGR) in a closed circuit with a vibrating screen ensures a higher degree of ore grain liberation at lower specific energy consumption compared to conventional ball milling. It is shown that prolonged grinding is accompanied by degradation of the magnetic properties of magnetite due to disruption of the domain structure and partial oxidation with the formation of maghemite and hematite. From the standpoint of the nanostructural approach, it is substantiated that the observed degradation is a natural consequence of the transition of mineral grains into the nanoscale range (1–100 nm) under excessive mechanical dispersion. The concept of explosive ore preparation as a nanostructurally oriented pre-dispersion method is introduced into scientific use – in particular, the improved channel detonator (ICD) method, protected by Ukrainian patents. It is proven that increasing the explosive impulse intensity by 40 times compared to standard blasting ensures preliminary microcracking along the grain boundaries of magnetite and quartz at the quarry stage, which allows reducing the duration of subsequent mill grinding, preserving the magnetic properties of the ore mineral, and reducing the environmental load on tailings storage facilities.

Key words: magnetite quartzites, grinding, high-pressure grinding rolls, magnetic properties, nanostructural approach, explosive ore preparation, improved channel detonator, ore preparation.

Вступ. Подрібнення залізних руд є однією з найбільш енергоємних і технологічно відповідальних операцій у циклі збагачення магнетитових кварцитів. На збагачувальних фабриках

витрати на рудопідготовку становлять від 40 до 60 % загального енергоспоживання підприємства [1]. У зв'язку з цим вдосконалення схем подрібнення, обґрунтування оптимальних

режимів подрібнення та оцінка мінералогічних трансформацій, що відбуваються у процесі механічного диспергування руди, набувають першочергового науково-практичного значення.

Магнетитові кварцити є основною рудною сировиною чорної металургії України. Їх переробка на залізорудний концентрат із вмістом заліза не менше 68 % передбачає послідовне подрібнення руди до тонини, що забезпечує достатній ступінь розкриття рудних зерен, та подальшу магнітну сепарацію. При цьому якість концентрату та ефективність збагачення визначаються не лише крупністю кінцевого продукту подрібнення, а й мінералогічним станом магнетиту, його магнітними характеристиками та морфологією зерен.

Методи та методики дослідження. Проблематика подрібнення магнетитових кварцитів активно досліджується у вітчизняній та світовій наукових спільнотах. Аналіз сучасних публікацій дозволяє виявити декілька напрямів: технологічний (оптимізація схем і обладнання), мінералогічний (вивчення фазових перетворень у процесі переробки), магнітомінералогічний (зміни магнітних властивостей рудних мінералів), математично-модельний (математичний опис і оптимізація процесів класифікації та подрібнення) та екологічний (оцінка впливу продуктів подрібнення на довкілля).

Метою цієї статті є систематизація та порівняльний аналіз ключових досліджень у зазначених напрямках, обґрунтування концепції вибухової підготовки руди як наноструктурно орієнтованого методу попереднього диспергування, здатного суттєво підвищити енергоефективність усього циклу рудопідготовки.

Аналіз літературних джерел. Одним із найбільш актуальних технологічних напрямів сучасної рудопідготовки є впровадження у дробленні руд валків високого тиску (HPGR – High Pressure Grinding Rolls). Вони використовуються як альтернативні конусним дробаркам дрібного дроблення або як додаткове обладнання до традиційного кульового подрібнення. Дослідженню цього питання присвячена робота, в якій розглянуто технологію рудопідготовки залізистих кварцитів Первомайського родовища із застосуванням HPGR у замкнутому циклі з віброгрохотом [1]. Авторами здійснено порівняльний аналіз двох промислових схем: традиційного чотирьохстадійного дроблення з попереднім грохоченням до класу -25 мм та запропонованої трьохстадійної схеми із застосуванням HPGR до крупності -16 мм. Встановлено, що використання валків високого тиску забезпечує вищий ступінь розкриття рудних

зерен при еквівалентних витратах енергії, що пояснюється принципово іншим механізмом руйнування матеріалу - переважно за межами зростання мінеральних зерен, а не крізь тіло зерна. Зменшення крупності живлення кульових млинів до -16+0 мм сприяє підвищенню ефективності наступної стадії магнітної сепарації та дозволяє досягти цільового показника вмісту заліза в концентраті на рівні не менше 68 %. Практична значущість наведеного дослідження визначається його безпосередньою орієнтованістю на умови реального виробництва. Запропонована технологічна схема може бути застосована при модернізації збагачувальних фабрик, що переробляють руди Криворізького залізорудного басейну. Водночас слід зазначити, що результати отримані для конкретного родовища – Первомайського, і тому потребують додаткової адаптації при перенесенні на інші об'єкти, які переробляють руди з іншими структурно-текстурними характеристиками.

Апарат HPGR використовує принцип міжчастинкового стиснення в шарі матеріалу між валками, що зумовлює утворення мікротріщин всередині зерен та зменшуючи питоме енергоспоживання на наступних стадіях подрібнення. Схема пропрацювала понад 7000 годин без заміни валків, що підтверджує її надійність для умов реального промислового виробництва [2].

Енергетичну методологію розрахунку та вибору HPGR для схем дроблення у твердих породах розробив Morrell [3]. Рівняння методу Morrell прогнозують питомі витрати енергії схеми з похибкою не більше 6,5 %. Аналіз підтвердив, що нижчий питомий тиск подрібнення покращує ефективність HPGR, а продуктивність кульових млинів у складі схеми з HPGR може бути підвищена на 20 % за рахунок оптимізації умов роботи млина [3].

Нова схема рудопідготовки, а саме - HPGR + одностадійне подрібнення + двостадійна безперервна класифікація впроваджена на вольфрамівій збагачувальній фабриці. Вона дозволила змінити не тільки крупність дробленого продукту, але й знизилася кількість шламових класів у продуктах подрібнення і збільшила ефективність класифікації за класом -0,044 мм у замкнутому циклі [4].

Для дрібнозернистих магнетитових руд енергоємність подрібнення до крупності нижче 0,030 мм може перевищувати 30 кВт·год/т, а це на порядок більше, ніж для гематитових руд, що обумовлює першочергову актуальність пошуку енергоощадних схем подрібнення. Принципово нову схему переробки залізної руди, у якій традиційне багастадійне дроблення з флотацією

замінено на комбінацію подрібнення з одностадійною магнітною або гравітаційною сепарацією у рефлюкс-класифікаторі розроблено у роботі і це виключає необхідність дешламації (сотні гідроциклонів) і флотаційних реагентів, що суттєво знижує капітальні та операційні витрати і зменшує екологічне навантаження порівняно з традиційними схемами збагачення залізних руд [5].

При обстеженні золото- і мідь видобувних підприємств було встановлено, що подрібнення споживає від 35 до 50 % загальних витрат шахти, а сукупне енергоспоживання галузі для цих металів становить 0,2 % світового і 1,3 % австралійського електроспоживання. Аналіз показав, що вміст металу в руді є вагомим фактором питомого енергоспоживання на подрібнення, а не твердість руди чи крупність подрібнення. Найбільший потенціал для зниження енерговитрат криється у попередній концентрації або збагаченні руди до стадії подрібнення, що є теоретичним обґрунтуванням методів попереднього збагачення, включаючи вибухову підготовку [6].

Результати інших досліджень показали, що механохімічний синтез наночастинок оксиду заліза у кульовому млині дозволяє отримувати нанорозмірні фази зі структурою шпінелі при розмірах частинок 6–12 нм, при цьому присутність Fe у вихідній суміші відіграє вирішальну роль у формуванні магнітних шпінельних фаз. Синтезовані наночастинки продемонстрували намагніченість насичення 55–57 е.м.о./г і дуже малу коерцитивну силу (12–19 Е), що є характерними ознаками суперпарамагнітного стану. Отримані результати показали, що у ході тривалого кульового подрібнення зерна магнетиту переходять у нанодіапазон, набуваючи суперпарамагнітних властивостей, що фіксуються як деградація намагніченості у продуктах збагачення [7].

Певний аналіз ME, XRD і VSM, в ході якого встановлено, що вибір тривалості подрібнення дозволяє регулювати розмір наночастинок і склад порошку. Дипольна магнітна взаємодія між суперпарамагнітними наночастинками індукуює магнітне блокування. Цей підкреслює, що надмірне подрібнення неминуче переводить зерна магнетиту у суперпарамагнітний стан з різко зниженою намагніченістю, що погіршує ефективність магнітної сепарації на збагачувальних фабриках [8].

Метод дисперсійного аналізу (ANOVA) і методологію поверхні відгуку (RSM) застосували науковці, які встановили, що валки з більшим співвідношенням ширини до діаметра

забезпечують кращі показники подрібнення та нижче питоме енергоспоживання. Побудована модель прогнозування показників HPGR через регресійний аналіз відкриває можливість оптимізації конструктивних і технологічних параметрів апарата без необхідності дорогостоячих фізичних випробувань [9].

Дослідники Бразилії проводили серію обстежень чотирьох промислових HPGR різного діаметра (1,4–2,25 м) та співвідношення розмірів (0,88–1,45), що працюють на заводах компанії Vale (Бразилія) для перевірки моделі Торреса–Касалі. Встановлено, що оригінальна модель занижує потужність приблизно на 60 %. Модифікація рівняння із введенням машинно-залежного коригувального коефіцієнта для кута захоплення дозволила суттєво підвищити точність прогнозування для промислових масштабів. Результати довели необхідність спеціального калібрування моделей при перенесенні з дослідного на промисловий масштаб. І цей висновок є загальнометодологічним застереженням для всіх математичних моделей рудопідготовки [10].

Про екологічну загрозу через можливу присутність у хвостах природних радіоактивних матеріалів (NORM) йдеться в роботі, автори якої розробили інноваційні підходи до реінтеграції хвостів у виробничі ланцюжки, що дозволило зменшити обсяги накопичення токсичних відходів. Такий підхід є стратегічно важливим напрямом та відповідає принципам циркулярної економіки [11].

Іншим напрямом зниження енергоспоживання при рудопідготовці є підвищення рівня вибухової енергії, яке призводить до дрібнішого дроблення і збільшення кількості мікротріщин у первинних фрагментах. Хоча витрати на буріння і підривання при цьому зростають, загальні витрати «від кар'єру до готового продукту» знижуються. Дослідження на гірничій масі типу таконіт показало, що збільшення кількості детонівних шнурів зменшує P80 продуктів подрібнення з 2,91 мм до 0,73 мм і знижує індекс роботи Бонда з 14,4 до 3,9 кВт·год/т, що є прямим кількісним підтвердженням ефективності попереднього мікротріщиноутворення [12].

Дослідження на таконіті показали, що вибухове підривання індукуює у фрагментах гірничої маси внутрішні мікротріщини вибуху, які знижують їх міцність порівняно з непошкодженою породою і полегшують усі наступні операції, включаючи дроблення і подрібнення. Будь-яке збільшення рівня вибухової енергії через підвищення коефіцієнта порошку підвищує подрібнюваність мінералів, додавання детонівного

шнура як основного заряду збільшує густину мікротріщинної мережі всіх типів у фрагментах. Вибір типу вибухової речовини є окремим інструментом керування процесом мікротріщиноутворення: різні ВР забезпечують різну щільність і морфологію мікротріщин, що відкриває можливість цілеспрямованої оптимізації вибухопідготовки з урахуванням мінералогічних цілей наступного подрібнення – зокрема, збереження доменної структури магнетиту [13].

Розуміння мінералогічних трансформацій, що відбуваються на різних стадіях подрібнення, є необхідною умовою для науково обґрунтованого управління технологічними режимами збагачення. Цьому аспекту присвячено дослідження науковців [14], у якому простежено мінеральні та фізико-хімічні зміни магнетитових кварцитів Валявкинського та Новокриворізького родовищ Кривбасу впродовж усього технологічного ланцюжка - від руди у природному заляганні до кінцевого концентрату [14]. Авторами встановлено, що вже після першої стадії подрібнення відбувається часткове розкриття зерен магнетиту і кварцу, однак ступінь розкриття залишається недостатнім для ефективної магнітної сепарації. Після третьої стадії ступінь розкриття наближається до максимальних значень, однак водночас фіксується погіршення кристалічної впорядкованості магнетиту, що виражається у розширенні рефлексів на дифрактограмах РФА та зменшенні величини питомої намагніченості насичення. Дешламація після другої стадії подрібнення дозволяє видалити тонкі шламові фракції, збагачені карбонатами і хлоритами, що позитивно впливає на якість концентрату.

Особливу наукову цінність має порівняльний характер дослідження: паралельний аналіз руд двох родовищ виявив суттєві відмінності у поведінці мінералів під час переробки. Зокрема, магнетитові кварцити Валявкинського родовища характеризуються дрібнозернистою будовою і вищим початковим ступенем замагніченості, тоді як руди Новокриворізького родовища мають більш неоднорідну текстуру і потребують тонкішого подрібнення для досягнення аналогічного ступеня розкриття. Ці відмінності свідчать про необхідність індивідуального підходу до проектування технологічних схем для кожного з родовищ, що є практично важливим висновком для проектних організацій.

Поряд із суто технологічними і мінералогічними аспектами, подрібнення магнетитових кварцитів породжує низку екологічних проблем, пов'язаних із утворенням значних об'ємів дрібнодисперсних відходів. Ця проблематика

є предметом дослідження авторів, присвяченого вивченню потенційного впливу продуктів диспергування магнетитових кварцитів на довкілля на прикладі ПРАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» [15]. Із застосуванням рентгенофазового аналізу, термогравіметрії та седиментаційного аналізу авторами встановлено, що в ході механічного подрібнення відбувається переважне руйнування другорядних мінералів – карбонатів, хлоритів, амфіболів, сульфідів. Основним продуктом їхньої деструкції у хвостах збагачення є кварц у дисперсному стані. Фракція дисперсного кварцу крупністю менше 5 мкм становить значну частку хвостосховищних матеріалів і є потенційно небезпечною при вдиханні – через добре відомий фіброгенний ефект вільного діоксиду кремнію. Крім того, у хвостах ідентифіковано субмікронні частинки магнетиту і маггеміту, здатні до тривалого аерозольного перенесення і проникнення у підземні водоносні горизонти при вищелочуванні хвостосховищ атмосферними опадами.

Дослідження також показало, що у хвостосховищах тривають процеси вторинного механічного і хімічного вивітрювання, які збільшують вміст пилоактивних фракцій з часом. Це свідчить про потребу у систематичному геоecологічному моніторингу відповідних об'єктів і впровадженні заходів із пилозакріплення поверхні хвостосховищ. Зазначене дослідження займає важливе місце в системі наукових знань про подрібнення залізних руд, оскільки вводить у поле аналізу екологічний вимір, що є обов'язковим компонентом сучасної оцінки гірничо-збагачувальних виробництв.

Питання деградації магнітних властивостей магнетиту в процесі подрібнення є критично важливим для визначення оптимальних параметрів подрібнення, оскільки саме від цих властивостей залежить ефективність магнітної сепарації – основного методу збагачення залізних руд. Зазначена проблематика детально розглядається у публікації, де на матеріалі магнетитових кварцитів Ігулецького родовища Кривбасу колективом авторів встановлено, що тонке подрібнення в кульових млинах супроводжується поступовим і статистично достовірним зниженням питомої намагніченості насичення магнетиту [16]. Цей процес обумовлений двома одночасно діючими механізмами. По-перше, ударні та стираючі навантаження у млині порушують доменну структуру магнетиту, що веде до переходу частини зерен від полідоменного до псевдоодномоного або суперпарамагнітного стану з нижчою результуючою намагніченістю. По-друге, відбувається часткове окиснення

магнетиту з утворенням магеміту ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), а при більш тривалому подрібненні – гематиту і мартиту, намагніченість яких на порядок нижча порівняно з вихідним магнетитом. Ці трансформації виявляються термомагнітометричним методом за характерними зміщеннями точки Кюрі та зменшенням площі петлі гістерезису.

Практичний висновок наведеного дослідження полягає у тому, що надмірне подрібнення є контрпродуктивним навіть при досягненні достатнього ступеня розкриття рудних зерен: деградація магнітних властивостей призводить до погіршення витягнення заліза в концентрат і збільшення його втрат з хвостами магнітної сепарації. Це визначає існування оптимального діапазону крупності подрібнення, який є специфічним для кожного родовища.

Суміжну проблематику досліджено у роботі, де основна увага зосереджена на методологічних засадах діагностики ступеня окиснення магнетиту в реальних продуктах збагачення [17]. Авторами запропоновано методику поєднаного застосування рентгенофазового аналізу та термомагнітометрії з попереднім фракціонуванням матеріалу за магнітними властивостями. Встановлено, що в межах однієї технологічної проби одночасно присутні зерна незміненого магнетиту (у сильномагнітній фракції) і значно окиснені фрагменти з переважанням магеміту (у слабомагнітній фракції). Нерівномірність окиснення посилюється зі збільшенням питомої поверхні матеріалу, тобто дрібніші класи крупності зазнають більш інтенсивного окиснення, що узгоджується з фізичними уявленнями про поверхнево-активні процеси. Запропонована методика може бути використана для оперативного контролю якості на збагачувальних фабриках.

Окреме місце у системі наукових знань про подрібнення залізних руд займають фундаментальні теоретичні та навчально-наукові праці, що узагальнюють здобутки галузі та формують концептуальну основу для прикладних досліджень. У цьому контексті особливої уваги заслуговують роботи науковців, які висвітлили теоретичні та прикладні засади усіх основних процесів збагачення: підготовчих (дроблення, подрібнення, грохочення), основних (гравітаційне, флотаційне, магнітне, електричне збагачення) та заключних (зневоднення, фільтрування, хвостове господарство). Розділи, присвячені подрібненню, містять класифікацію видів і методів подрібнення, аналіз конструкцій млинів, методики розрахунку схем подрібнення та критерії вибору оптимального режиму подрібнення. Саме у цьому дослідженні автори

сформулювали системні підходи до проектування відділень рудопідготовки на збагачувальних фабриках Криворізького басейну, що безпосередньо визначає його значення для практики; в роботі систематизовано та критично проаналізовано сучасні математичні моделі процесу грохочення – ключової операції, що визначає ефективність замкнених циклів подрібнення. Автори застосували модель О.М. Тихонова для опису щільності розподілу підрешіткової сепараційної характеристики як випадкової величини та провели імітаційне моделювання з використанням розподілу RRSB (Rosin–Rammner–Sperling–Bennett). Результати підтвердили адекватність запропонованого математичного опису реальним технологічним процесам збагачення магнетитових кварцитів [18; 19].

Значення цих праць для розуміння процесів подрібнення є багатоаспектним. По-перше, вони забезпечують теоретичну базу для інтерпретації результатів прикладних досліджень – зокрема, пояснюють математичні закономірності, що лежать в основі ефектів, задокументованих у роботах науковців. По-друге, математичне моделювання процесів класифікації за крупністю є інструментом для оптимізації замкнених циклів подрібнення з HPGR та гідроциклонами, що дозволяє знизити надлишкове подрібнення і пов'язану з ним деградацію магнітних властивостей магнетиту. По-третє, системний виклад технологій рудопідготовки у навчальному посібнику слугує методологічною основою для навчання спеціалістів і формує спільну термінологічну та концептуальну платформу для всіх наступних досліджень у галузі.

Розглянуті дослідження характеризуються тематичною комплементарністю: кожне з них охоплює окремий аспект проблеми подрібнення магнетитових кварцитів, і лише у сукупності вони формують цілісне наукове уявлення про цей процес. З методологічного погляду, переважна більшість розглянутих робіт спирається на рентгенофазовий аналіз (РФА) та термомагнітометрію як базові аналітичні інструменти. Це відображає загальноприйнятий стандарт у дослідженнях залізорудної мінералогії і забезпечує зіставність результатів між окремими публікаціями.

Окремої уваги заслуговує наноструктурний вимір процесу подрібнення, який у вітчизняній літературі з рудопідготовки залізних руд висвітлено недостатньо. Сучасні дослідження в галузі матеріалознавства переконливо демонструють, що механічне подрібнення є не лише технологічною операцією зменшення крупності, а й методом цілеспрямованого синтезу

наноматеріалів – структур із розміром частинок у діапазоні 1–100 нм [20]. При тривалому або високоенергетичному подрібненні частинки мінералів неминуче переходять у нанодіапазон, що супроводжується якісною зміною їхніх фізико-хімічних та магнітних властивостей. Розуміння цих закономірностей є необхідною передумовою для наукового обґрунтування меж оптимального подрібнення магнетитових кварцитів. Зафіксоване у хвостах збагачення субмікронних та нанорозмірних фракцій оксидів заліза є не випадковим побічним продуктом, а закономірним результатом механічних процесів, що розгортаються на нанорівні під час подрібнення. Осмислення цих процесів потребує звернення до досягнень сучасного матеріалознавства у галузі механічного синтезу наноматеріалів. У сучасному матеріалознавстві механічне подрібнення розглядається як один із найбільш доступних і масштабованих методів синтезу наноматеріалів за принципом «згори вниз» (top-down), при якому вихідна сировина макроскопічних розмірів послідовно диспергується до нанодіапазону. На відміну від хімічних методів синтезу наночастинок, механічне подрібнення не потребує застосування токсичних реагентів і реалізується безпосередньо в промислових млинах, що робить його особливо актуальним для аналізу збагачувальних процесів [20].

Механізм переходу частинок у нанодіапазон при кульовому подрібненні описується чотирма послідовними стадіями [21]. На першій – *стадії стиснення* – частинки зазнають пластичної деформації та сплющуються без руйнування. На другій – *стадії холодного зварювання* – сплюснені частинки зліплюються між собою під дією локального тиску. На третій – *стадії фрактури* – накопичені внутрішні напруження призводять до розтріскування та фрагментації агломератів. Нарешті, на четвертій – *стадії динамічної рівноваги* – швидкості зварювання та руйнування вирівнюються, і система досягає стабільного нанорозмірного стану з розміром частинок у межах 1–100 нм. Саме ця стадія відповідає умовам тривалого або надмірного подрібнення на збагачувальних фабриках.

Практична значущість цього підходу для розуміння поведінки магнетитових кварцитів підтверджується прямими експериментальними даними. Зокрема, науковці задокументували, що кульове подрібнення порошку $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематиту) у атриторному млині протягом 100 годин зменшує розмір частинок від вихідних ~1 мм до ~15 нм. Цей результат є принципово важливим у контексті переробки магнетитових

кварцитів: оксиди заліза – структурно споріднені мінерали – демонструють аналогічну поведінку при інтенсивному механічному диспергуванні, переходячи з полікристалічного у нанокристалічний стан.

Перехід у нанодіапазон супроводжується не лише зменшенням розміру частинок, а й глибокою перебудовою мікроструктури. Автори показали, що зі збільшенням тривалості подрібнення розмір кристалітів закономірно зменшується, а щільність дефектів і внутрішні напруження зростають [22]. Для магнетиту це означає прогресивне порушення доменної структури: у міру того, як зерна зменшуються до нанометрових розмірів, вони переходять із полідоменного стану через псевдооднодоменний до суперпарамагнітного, при якому результуюча намагніченість різко знижується. Цим пояснюється статистично достовірна деградація питомої намагніченості насичення магнетиту, зафіксована у роботах вітчизняних дослідників – вона є прямим наслідком наноструктурних перетворень, що відбуваються у млині [22].

Таким чином, наноструктурний підхід надає фізично обґрунтоване пояснення явищам, задокументованим у попередніх розділах цього огляду: деградація магнітних властивостей магнетиту при надмірному подрібненні та утворення нанорозмірних фракцій у хвостах збагачення є не незалежними ефектами, а двома проявами єдиного механізму – переходу мінеральних зерен у нанодіапазон під дією механічної енергії. Це, своєю чергою, підтверджує актуальність встановлення оптимального діапазону крупності подрібнення як завдання, що має вирішуватися не лише на технологічному, а й на фізико-хімічному рівні.

Результати досліджень. Проведений нами систематичний аналіз наукових підходів до подрібнення магнетитових кварцитів дозволяє не лише узагальнити здобутки різних напрямів, а й обґрунтувати оригінальний метод вибухової підготовки руди - удосконалений каналний бойовик (УКБ) - як практичну реалізацію концепції наноструктурно орієнтованого попереднього диспергування [23].

В основі методу УКБ лежить каналний ефект: випереджаюча ударна хвиля збуджує в каналі наростаючу детонацію, інтенсивність якої може зростати в n разів. Удосконалення полягає у тому, що дві зустрічні ударні хвилі запускаються у трубі, розміщеній всередині свердловинного заряду вибухової речовини. Труба відділена оболонкою від основної вибухової речовини, що дозволяє повністю наситити канал високотемпературною плазмою

без провокування неконтрольованої детонації заряду. Внаслідок цього детонація збуджується одночасно по всій висоті свердловинного заряду менш ніж за 1 мкс, а вектор детонації змінюється з вертикального на горизонтальний. Конструкція свердловинного заряду з УКБ включає такі елементи: забійку свердловини (1), хвилевод (2), детонуючий шнур ДШЕ-12 (3), власне УКБ (4) – циліндр з інертного матеріалу, патрон-бойовик (5) та свердловину (6) (рис.1).

Фізичне обґрунтування підвищення ефективності розкриття зерен ґрунтується на наступному. Приймавши критичний діаметр вибухової речовини (емоніт – 120 мм) як площу одночасної незатухаючої детонації у стандартному заряді, у якому фронт детонації рухається вертикально на відстань ~ 10 м, і порівнявши це з конструкцією УКБ, де детонація розповсюджується горизонтально на відстань $\sim 0,4$ м, отримуємо скорочення шляху руху детонаційного фронту у 25 разів. Відповідно, руйнівний тиск продуктів вибуху діє на корпусулу магнетитової руди у 40 разів інтенсивніше ($1000 \text{ см} : 25 = 40$), утворюючи в ній необоротні деформації – мікротріщини по межах зростання зерен магнетиту та кварцу. Саме цей механізм є наноструктурно орієнтованим: на відміну від класичного підривання, при якому мікротріщиноутворення є побічним, нерівномірним ефектом, УКБ цілеспрямовано формує щільну мережу мікротріщин ще на стадії кар'єрних робіт – переважно по міжзерновим межах, тобто там, де згодом має відбуватися розкриття рудного мінералу.

Для перевірки запропонованих технічних рішень на Центральному гірничо-збагачувальному комбінаті (ПрАТ «ЦГЗК», м. Кривий Ріг) проведено промисловий експеримент на блоці №32, горизонт –302 м. Загальний об'єм підірваної гірничої маси склав 51,5 тис. м³ (49,1

тис. м³ руди + 2,4 тис. м³ скелі); кількість відбурених свердловин – 121 шт., погонаж – 1569 м. Міцність порід за шкалою проф. Протодяконова: руда – 16, скеля – 12. Блок поділено на три частини з різними схемами підривання: південна частина (сітка 6×6 м, 40 свердловин), центральна (сітка 5×5 м, 55 свердловин) та північна (сітка 6×6 м з застосуванням УКБ-2, 26 свердловин).

Порівняльний аналіз питомих витрат вибухової речовини між частинами блоку демонструє принципову перевагу УКБ: у північній частині з УКБ-2 при сітці свердловин 6×6 м досягнуто питомих витрат ВР руда – 1,012 кг/м³ при виході гірничої маси з 1 п.м. свердловини 37,27 м³/м і виході з однієї свердловини – 473 м³. Для порівняння, у південній частині (класична сітка 6×6 м без УКБ) питомі витрати ВВ склали 1,081 кг/м³ при виході 485 м³ з однієї свердловини. Центральна частина (щільніша сітка 5×5 м) при витратах 1,375 кг/м³ забезпечила лише 360 м³ виходу з однієї свердловини. Таким чином, застосування УКБ дозволяє за меншого питомого споживання ВР зберегти кількісний вихід гірничої маси на рівні стандартної схеми, суттєво підвищуючи якість фрагментації.

Результати гранулометричного аналізу гірничої маси, визначеного за фотознімками поверхні розвалу, наведено у табл. 1.

Отримані дані свідчать про кардинальне покращення якості фрагментації: застосування УКБ-2 при сітці 6×6 м забезпечило розмір середнього куска 50,0 мм проти 130,8 мм при класичному підриванні за тією самою сіткою – зменшення у 2,6 раза. При порівнянні з ділянкою, де класична схема дала середній кусок 489,7 мм, перевага УКБ є ще разючою: більш ніж дев'ятиразове зменшення середнього куска. Частка фракції 0–100 мм при УКБ склала 63,5% –

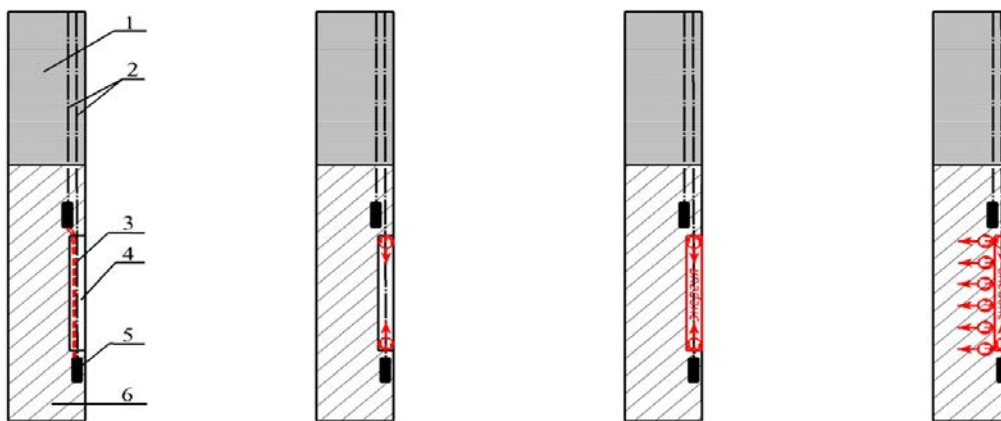


Рис. 1. Конструкція свердловинного заряду з УКБ

Таблиця 1

**Гранулометричний склад гірничої маси на горизонті – 302 м, блок №32, м.о. 150–170
(сітка свердловин 6×6 м)**

Схема підривання	Вихід фракцій, %						Розмір середнього куска, мм
	0-100 мм	100-200 мм	201-300 мм	301-400 мм	401-500 мм	>500 мм	
З УКБ – 2 (пн. Частина)	63,5	29,8	4,0	1,9	0,8	0,0	50,0
Класична (пн. Частина)	45,8	21,9	18,4	8,6	2,4	2,9	130,8
Класична без УКБ	4,4	5,2	3,3	4,9	4,9	58,5+19,3 (>1200)	489,7

майже вдвічі більше, ніж при стандартному підриванні (45,8 %), і у 14 разів більше порівняно з найгіршим варіантом (4,4 %).

Формування щільної мережі мікротріщин по межах зростання зерен магнетиту та кварцу ще на стадії кар'єрного підривання доводить, що попередня структурна підготовка матеріалу на гірничому переділі суттєво знижує опір руди на всіх наступних стадіях дробарно-млинового циклу. Зменшення розміру середнього куска у 2,6–9,8 раза означає пропорційне зниження питомого навантаження на щелепні та конусні дробарки, а також скорочення тривалості помелу в кульових млинах для досягнення заданої тонини продукту. З позицій наноструктурного підходу, обґрунтованого у цьому дослідженні, скорочення тривалості помелу є принципово важливим: саме цим досягається збереження доменної структури зерен магнетиту в межах полідоменного або псевдооднодоменного стану з максимальною питомою намагніченістю насичення, що безпосередньо підвищує ефективність магнітної сепарації та вихід концентрату.

Метод УКБ, захищений патентами України та апробований на Центральному ГЗК, є конкретно технічною реалізацією цього підходу, адаптованою до умов залізорудних родовищ України [23].

Висновки. Проведений аналіз наукових досліджень з практичного застосування підходів до подрібнення магнетитових кварцитів дозволяє сформулювати такі висновки.

1. Застосування валків високого тиску (HPGR) у замкненому циклі з віброгрохотом є перспективним напрямом модернізації рудопідготовки залізистих кварцитів Криворізького залізорудного басейну. Завдяки принципово іншому механізму руйнування – переважно по міжзерновим межах – HPGR забезпечує вищий ступінь розкриття рудних мінералів при нижчих питомих витратах електроенергії, що дозволяє досягти вмісту заліза у концентраті на рівні 68 % і вище.

2. Кожна стадія подрібнення супроводжується специфічними мінералогічними перетвореннями: поступовим розкриттям рудних зерен, механохімічними змінами кристалічної структури магнетиту, а також диференційованим руйнуванням другорядних мінералів. Ці зміни мають враховуватися при проектуванні та оптимізації технологічних схем, оскільки вони безпосередньо впливають на ефективність наступних операцій збагачення.

3. Існує оптимальний діапазон крупності подрібнення, перевищення якого призводить до деградації магнітних властивостей магнетиту внаслідок порушення доменної структури та часткового окиснення з утворенням гематиту і гематиту. Зазначена деградація знижує ефективність магнітної сепарації, збільшуючи втрати заліза з хвостами, а отже, надмірне подрібнення є не лише марнотратним з енергетичного погляду, а й технологічно шкідливим.

4. Продукти подрібнення магнетитових кварцитів – насамперед дисперсний кварц і тонкодисперсні оксиди заліза у хвостах збагачення – становлять потенційну екологічну та санітарно-гігієнічну небезпеку, що обумовлює необхідність систематичного геоекологічного моніторингу хвостосховищ і впровадження заходів із мінімізації пилоутворення.

5. Перспективними напрямками подальших досліджень є: розширення географії вивчення на родовища поза межами Кривбасу; розробка комплексних міждисциплінарних методик, що поєднують технологічний і мінералогічний аналіз у рамках єдиного дослідження; а також розроблення систем автоматизованого контролю ступеня подрібнення на основі онлайн-вимірювання магнітних характеристик пульпи.

6. Наноструктурний аналіз процесу подрібнення дає фізично обґрунтоване пояснення деградації магнітних властивостей магнетиту: при тривалому подрібненні зерна переходять у нанодіапазон (1–100 нм), що супроводжується порушенням доменної структури та переходом

у суперпарамагнітний стан із суттєво зниженою намагніченістю. Цей підхід відкриває перспективу для обґрунтування меж оптимального подрібнення не лише на основі технологічних критеріїв (ступінь розкриття рудних зерен), а й із урахуванням мікроструктурних змін на нанорівні.

7. Сукупний ефект від застосування методу УКБ у циклі рудопідготовки магнетитових кварцитів може бути описаний у чотирьох взаємопов'язаних вимірах: *енергетичний*: скорочення питомих витрат електроенергії на стадіях дроблення та помелу за рахунок зменшення міцності гірничої маси після якісної вибухопідготовки; *технологічний*: підвищення ступеня розкриття рудних зерен при меншій тривалості помелу; збереження магнітних властивостей магнетиту внаслідок запобігання надмірному переходу зерен у нано-діапазон; підвищення виходу концентрату; *ресурсний*: зменшення витрат дробильних куль, запасних

частин та інших витратних матеріалів унаслідок зниження навантаження на дробарно-млинове обладнання; *екологічний*: зменшення обсягів шламових фракцій нанорозмірного діапазону у хвостах збагачення, що знижує екологічне навантаження на хвостосховища.

8 Світовий досвід застосування вибухопідготовки руди підтверджує реалістичність кожного з цих ефектів. Метод УКБ, захищений патентами України та апробований на Центральному ГЗК, є конкретно технічною реалізацією цього підходу, адаптованою до умов залізрудних родовищ України. Технологія УКБ сумісна з широким спектром вибухових речовин – у тому числі з екологічно чистими та економічно доступними простими вибуховими речовинами: ігданітом, аміачною селітрою (NH_4NO_3) та їх похідними. Всі компоненти цих вибухових речовин наявні в Україні у повному асортименті, що знижує залежність від імпорتنих матеріалів і зменшує собівартість вибухопідготовки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Стоялов В. В. Технологія рудопідготовки залізистих кварцитів Первомайського родовища із застосуванням валків високого тиску : дис. канд. техн. наук. Криворізький національний університет, 2024. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/6824>
2. Li L., et al. Evaluating the performance of an industrial-scale high pressure grinding rolls (HPGR)-tower mill comminution circuit. *Minerals Engineering*. 2023. 183. 107592. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107973>
3. Morrell S. Helping to reduce mining industry carbon emissions: A step-by-step guide to sizing and selection of energy efficient high pressure grinding rolls circuits. *Minerals Engineering*. 2022. 176. 107340. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107431>
4. Caibin Wu, Junquan Lai et al. Energy saving and grinding circuit optimization in tungsten ore processing plant through high pressure grinding rolls and one stage grinding design: An industrial case study. *Minerals Engineering*. 2025. 224. 109228. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109276>
5. Armando F. d. V. Rodrigues, Homero Delboni Junior, Klaydison Silva. Transforming iron ore processing – Simplifying the comminution and replacing reverse flotation with magnetic and gravity separation. *Minerals Engineering*, 2023. 198. 108115. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108112>
6. Ballantyne G. R., Powell M. S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Minerals Engineering*. 2014. 65. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017>
7. Pedro A. Calderón Bedoya, Pablo M. Botta, María A. Fanovich. Influence of the milling materials on the mechanochemical synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. 938. 168527. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168720>
8. Carvalho R. M. S., et al. Synthesis of magnetite nanoparticles by high energy ball milling. *Applied Surface Science*. 2013. 275. 84–87. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.118>
9. Jianbo Guo, Shuai Wang, Zhengbin Liu, Shuwei Wu, Wei Guan, Haoyan Zhang. Simulation and analysis of high-pressure grinding rolls performance based on DEM-PRM. *Minerals Engineering*. 2024. 218. 108963. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109039>
10. Campos T. M. B., et al. Modeling comminution of iron ore concentrates in industrial-scale HPGR. *Powder Technology*. 2021. 383. 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.075>
11. Luis Felipe dos Santos Lara, Gustavo Filemon Costa Lima, Laís Resende, Augusto Cesar da Silva Bezerra. Recent advances and perspectives of eco-efficient building materials from iron ore tailing: characterization, performance, and consumption. *Journal of Cleaner Production*. 2025. 499. 145091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145488>
12. Nielsen K., Malvik T. Grindability enhancement by blast-induced microcracks. *Powder Technology*. 1999. 105(1–3). 52–56. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00117-5)

13. Amir Khademian, Raheb Bagherpour (2017). Alteration of grindability of minerals due to applying different explosives in blasting operation. *Minerals Engineering*, 111, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.016>
14. Губіна В. та ін. Мінеральні та фізико-хімічні зміни магнетитових кварцитів Валявкінського та Новокриворізького родовищ Кривбасу в процесах їх переробки. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2024. 1(104). 36-48. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.05>
15. Лавриненко О. М. та ін. Потенційний вплив продуктів диспергування магнетитових кварцитів на довкілля. *Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2022. № 3. 85–93. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265364>
16. Верховцев В. Г., Покалюк В. В., Губіна В. Г. та ін. Зміни магнітних властивостей магнетитових кварцитів Інгулецького родовища Кривбасу в процесі збагачення. *Геохімія техногенезу*. № 7. 42-46. DOI: <https://doi.org/10.32782/geotech2022.35.07>
17. Антоненко Т., Снісар В., Овсієнко В. Окиснення мінеральної фази магнетиту в процесі механічного подрібнення. *Scientific Collection «InterConf»*. 2024. № 188. С. 344–347. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conferenceproceeding/article/view/5428>
18. Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л. В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин : навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2020. 634 с.
19. Олійник Т. А., Невзоров В. В. Аналіз математичних моделей розділення матеріалу за крупністю з урахуванням властивостей обладнання, характеристик матеріалу та умов процесу грохочення. *Геотехнічна механіка*. 2024. Вип. 171. С. 47–58. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-259-272](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-259-272)
20. Yadav T. P., Yadav R. M., Singh D. P. Mechanical Milling: a Top Down Approach for the Synthesis of Nanomaterials and Nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*. 2012. Vol. 2, No. 3. P. 22–48. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.nn.20120203.01>
21. Joy J. та ін. Recent Developments on the Synthesis of Nanocomposite Materials via Ball Milling Approach for Energy Storage Applications. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 9312. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12189312>
22. Zahid M. S., Alabdullah F. A., Bassyouni M. Sustainable Approaches to Nanomaterial Synthesis Using Mechanical Grinding Methods. *International Journal of Industry and Sustainable Development*. 2026. Vol. 7, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.21608/ijisd.2026.446142.1094>
23. Гапоненко К. А., Бровко Д. А., Андрєєв Б. М., Кононенко В. В., Хворост В. В., Гапоненко Р. К., Олійник Т. А. Спосіб формування свердловинного заряду вибухової речовини. Патент на корисну модель №158695. МПК F42D 1/02, F42D 1/08, F42D 3/04, F42B 1/01, F42B 3/08, F42B 3/16, F42B 3/18. Номер заявки и 2024 04579. Дата подання заявки 23.09.2024. Дата опублікування 05.03.2025, Бюл.№10. 4 с.

REFERENCES:

1. Stoialov, V. V. (2024). Tekhnolohiia rudopidhotovky zalizystykh kvartsytiv Pervomaiskoho rodovyshcha iz zastosuvanniam valkiv vysokoho tysku [Technology of ore preparation of ferruginous quartzites of the Pervomaysk deposit using high-pressure rolls] (PhD thesis). Kryvorizky natsionalnyi universytet. <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/6824> [in Ukrainian]
2. Li, L., et al. (2023). Evaluating the performance of an industrial-scale high pressure grinding rolls (HPGR)-tower mill comminution circuit. *Minerals Engineering*, 183, 107592. . <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107973>
3. Morrell, S. (2022). Helping to reduce mining industry carbon emissions: A step-by-step guide to sizing and selection of energy efficient high pressure grinding rolls circuits. *Minerals Engineering*, 176, 107340. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107431>
4. Wu, C., & Lai, J., et al. (2025). Energy saving and grinding circuit optimization in tungsten ore processing plant through high pressure grinding rolls and one stage grinding design: An industrial case study. *Minerals Engineering*, 224, 109228. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109276>
5. Rodrigues, A. F. d. V., Delboni Junior, H., & Silva, K. (2023). Transforming iron ore processing – Simplifying the comminution and replacing reverse flotation with magnetic and gravity separation. *Minerals Engineering*, 198, 108115. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108112>
6. Ballantyne, G. R., & Powell, M. S. (2014). Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Minerals Engineering*, 65, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017>
7. Calderón Bedoya, P. A., Botta, P. M., & Fanovich, M. A. (2023). Influence of the milling materials on the mechanochemical synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 938, 168527. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168720>

8. Carvalho, R. M. S., et al. (2013). Synthesis of magnetite nanoparticles by high energy ball milling. *Applied Surface Science*, 275, 84–87. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.01.118>
9. Guo, J., Wang, S., Liu, Z., Wu, S., Guan, W., & Zhang, H. (2024). Simulation and analysis of high-pressure grinding rolls performance based on DEM-PRM. *Minerals Engineering*, 218, 108963. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109039>
10. Campos, T. M. B., et al. (2021). Modeling comminution of iron ore concentrates in industrial-scale HPGR. *Powder Technology*, 383, 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.075>
11. Lara, L. F. d. S., Lima, G. F. C., Resende, L., & Bezerra, A. C. d. S. (2025). Recent advances and perspectives of eco-efficient building materials from iron ore tailing: characterization, performance, and consumption. *Journal of Cleaner Production*, 499, 145091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145488>
12. Nielsen, K., & Malvik, T. (1999). Grindability enhancement by blast-induced microcracks. *Powder Technology*, 105(1–3), 52–56. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00117-5)
13. Khademian, A., & Bagherpour, R. (2017). Alteration of grindability of minerals due to applying different explosives in blasting operation. *Minerals Engineering*, 111, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.016>
14. Hubina, V. et al. (2024). Mineralni ta fizyko-khimichni zminy mahnetyovykh kvartsytyv Valiavy'nskoho ta Novokryvorizkoho rodovysch Kryvbasu v protsesakh yikh pererobky [Mineral and physicochemical changes of magnetite quartzites of Valiavynske and Novokryvorizka deposits of Kryvbas during processing]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiia – Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(104), 36–48. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.05> [in Ukrainian]
15. Lavrynenko, O. M. (2022). Potentsiinyi vplyv produktiv dysperhuvannia mahnetyovykh kvartsytyv na dovkillia [Potential environmental impact of magnetite quartzite dispersion products]. *Visnyk NTUU «KPI». Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozbezpezhennia – Bulletin of NTUU «KPI». Chemical Engineering, Ecology and Resource Conservation*, (3), 85–93. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265364> [in Ukrainian]
16. Verkhovtsev, V. H., Pokaliuk, V. V., Hubin, V. H. et al. Zminy mahnitnykh vlastyvostei mahnetyovykh kvartsytyv Ihulets'koho rodovyscha Kryvbasu v protsesi zbahachennia [Changes in magnetic properties of magnetite quartzites of the Inhulets deposit of Kryvbas during beneficiation]. *Heokhimiia tekhnolohii – Geochemistry of Technogenesis*. 7, 42–46. <https://doi.org/10.32782/geotech2022.35.07> [in Ukrainian]
17. Antonenko, T., Snisar, V., & Ovsienko, V. (2024). Okysnennia mineralnoi fazy mahnetytu v protsesi mekhanichnoho podribnennia. Scientific Collection «Inter Conf», 188, 344–347. <https://archive.interconf.center/index.php/conferenceproceeding/article/view/5428> [in Ukrainian]
18. Biletskyi, V. S., Oliinyk, T. A., Smyrnov, V. O., & Skliar, L. V. (2020). Osnovy tekhniki ta tekhnolohii zbahachennia korysnykh kopalyn [Fundamentals of technique and technology of mineral beneficiation]. *Lira-K*. [in Ukrainian]
19. Oliinyk, T. A., & Nevzorov, V. V. (2024). Analiz matematychnykh modelei rozdilennia materialu za krupnistiu z urakhuvanniam vlastyvostei obladnannia, kharakterystyk materialu ta umov protsesu hrokhottannia [Analysis of mathematical models of material separation by particle size considering equipment properties, material characteristics and screening conditions]. *Heotek'hnichna mekhanika – Geotechnical Mechanics*, 171, 47–58. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-259-272](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-259-272) [in Ukrainian]
20. Yadav, T. P., Yadav, R. M., & Singh, D. P. (2012). Mechanical Milling: a Top Down Approach for the Synthesis of Nanomaterials and Nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*, 2(3), 22–48. <https://doi.org/10.5923/j.nn.20120203.01>
21. Joy, J. et al. (2022). Recent Developments on the Synthesis of Nanocomposite Materials via Ball Milling Approach for Energy Storage Applications. *Applied Sciences*, 12, 9312. <https://doi.org/10.3390/app12189312>
22. Zahid, M. S., Alabdullah, F. A., & Bassyouni, M. (2026). Sustainable Approaches to Nanomaterial Synthesis Using Mechanical Grinding Methods. *International Journal of Industry and Sustainable Development*, 7(1). <https://doi.org/10.21608/ijisd.2026.446142.1094>
23. Haponenko, K. A., Brovko, D. V., Andrieiev, B. M., Kononenko, V. V., Khvorost, V. V., Haponenko, R. K., Oliinyk, T. A. (2026). Sposib formuvannia sverdlovynnoho zariadu vybukhovoi rehovyny. *Patent na korysnu model* №158695. MPK F42D 1/02, F42D 1/08, F42D 3/04, F42B 1/01, F42B 3/08, F42B 3/16, F42B 3/18. Nomer zaiavky u 2024 04579. Data podannia zaiavky 23.09.2024. Data opublikuvannia 05.03.2025, Biul. №10. 4 s.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 14.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 622.083

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-29>

ГЕОМЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ НА ОСІДАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ І СТІЙКІСТЬ ПОКРИВНИХ ПОРІД ВУГЛЕПОРОДНОЇ ТОВЩІ

Сахно Іван Георгійович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-8592-0572

Сахно Світлана Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3917-9143

Богомаз Ольга Петрівна,

PhD, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-8521-0394

Андрєєва Антоніна Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри екології та природоохоронних технологій

Національний університет караблєдування ім. Адмірала Макарова

ORCID ID: 0000-0002-0361-5436

Підземна газифікація вугілля (ПГВ) – це чиста безлюдна технологія видобутку вугілля з великим потенціалом. До основних екологічних небезпек, які стримують широке застосування цієї технології, віднесено високий ризик осідання поверхні, затоплення та забруднення води через тріщинуватість та зміщення порід розкриття над порожнинами реактора. Утворення порожнин внаслідок газифікації спричиняє перерозподіл напружень у навіколишніх породах, провокує ріст існуючих тріщин та утворення нових, що призводить до руйнування покрівлі реакторів, непружних деформацій порід покрівлі та притоків підземних вод до реакторів. Для подолання цих проблем важливим є забезпечення стійкості порід над порожнинами реакторів ПГВ.

Роботу присвячено аналізу впливу підземної газифікації вугілля на розкриті породи та земну поверхню. Для моделювання поведінки порід під час газифікації тонкого вугільного пласта застосовувався паралельний метод КППД та метод скінченних елементів у середовищі ANSYS, що дозволило визначити напружено-деформований стан та температурний розподіл у навіколишніх породах. Результати показали, що при збереженні несучої здатності запобіжних ціликів осідання поверхні та переміщення порід залишаються в межах допустимих значень, забезпечуючи мінімальний ризик негативного впливу газифікації на поверхню. Для газифікації пласта товщиною 1,05 м на глибині 392–465 м вертикальні осідання поверхні не перевищували 46 мм при ширині цілика 3,75 м та 27 мм при ширині 15,0 м, а висота зони зміни напружень над порожниною не перевищувала 70 м. Руйнування ціликів між порожнинами вигазовування призводить до істотного збільшення осідань – у 11,7 та 19,9 рази відповідно, що ставить під загрозу суцільність водонесних горизонтів та наземну інфраструктуру.

Ключові слова: підземна газифікація вугілля, стійкість ціликів, просідання поверхні, газифікація тонкого вугільного пласта, ширина запобіжного цілика.

Sakhno Ivan, Sakhno Svitlana, Bohomaz Olha, Andrieieva Antonina. Geomechanical analysis of the effect of underground coal gasification on ground settlement and the stability of the overlying strata in a coal-bearing formation

Underground coal gasification (UCG) is a clean, unmanned coal extraction technology with great potential. The main environmental hazards hindering the widespread adoption of this technology include a high risk of surface subsidence, flooding, and water contamination due to the fracturing and displacement of overlying strata above the reactor cavities. The formation of cavities because of gasification causes a redistribution of stresses in the surrounding rock, triggers the growth of existing cracks and the formation of new ones, leading to the collapse of the reactor roof, inelastic deformation of the roof rock, and the inflow of groundwater into the reactors. To address these issues, it is essential to ensure the stability of the rock mass above the UCG reactor cavities.

This study analyzes the impact of underground coal gasification on overlying strata and the Earth's surface. To model the behavior of rocks during the gasification of a thin coal seam, the parallel CMBP method and the finite element method were applied in the ANSYS environment, which made it possible to determine the stress-strain state and temperature distribution in the surrounding rocks. The results showed that, provided the bearing capacity of the safety pillars is maintained, surface subsidence and rock displacement remain within acceptable limits, ensuring a minimal risk of negative impact from gasification on the surface. Under the gasification of a 1.05-meter-thick formation at a depth of 392–465 meters, vertical surface settlements did not exceed 46 mm for a 3.75-meter-wide section and 27 mm for a 15.0-meter-wide pillar, and the height of the stress change zone above the cavity did not exceed 70 meters. The collapse of the pillars between gasification cavities leads to a significant increase in subsidence—by 11.7 and 19.9 times, respectively—which threatens the integrity of aquifers and surface infrastructure.

Key words: underground coal gasification, pillar stability, surface subsidence, thin coal seam gasification, safety pillar width.

Вступ. Технологія підземної газифікації вугілля (ПГВ) має більш ніж столітню історію розвитку. Перші згадки про ПГВ відносяться до 1868 року, коли німецький учений та інженер сер Вільям Сіменс запропонував ідею газифікації вугілля безпосередньо в пласті під час виступу перед Британським хімічним товариством. Поштовхом до розробки таких технологій стало суттєве погіршення якості атмосферного повітря у промислових центрах, спричинене масовим спалюванням вугілля в період промислової революції [1].

Перший дослідницький проект ПГВ було реалізовано у Британії на початку XX століття, проте через початок Першої світової війни випробування не були завершені. У подальші десятиліття технологія ПГВ активно розвивалася в СРСР, США, країнах Європи та Китаї, де нині реалізується найбільш масштабна програма її впровадження [2]. Загалом у світі було здійснено понад 50 пілотних проєктів з ПГВ [3; 4]. Однак, не дивлячись на це, технологія ПГВ досі не набула широкого комерційного застосування через ряд технічних та екологічних проблем [3–5].

Теоретично технологія підземної газифікації вугілля є відносно простою. Проте досвід великих польових випробувань у різних країнах останніх десятиліть демонструє, що ефективна та стабільна експлуатація на практиці є набагато складнішою [6–7]. Кожен майданчик ПГВ є унікальним, а специфічні для нього кон'юговані термо-гідро-хіміко-механічні процеси у породах, прилеглих до реактора, зазвичай погано вивчені в польових умовах через складність кількісної оцінки всіх реакцій і їх впливу на форму та обсяг реактора [8; 9]. Високі температури ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) у безпосередній близькості від реактора спричиняють складну термомеханічну поведінку породи та багатофазний потік рідини. Для стабільної роботи ПГВ критично важливо кількісно оцінити геомеханічні реакції, пов'язані з процесом, зокрема зміну проникності, руйнування порід і реактивацію розломів [10; 11].

Окрім технічних питань, що обмежують застосування ПГВ, значну роль відіграють

екологічні небезпеки. Перш за все, існує високий ризик просідання поверхні, затоплення та забруднення води через тріщинуватість та зміщення порід розкрити над порожнинами реактора. Утворення порожнин внаслідок газифікації спричиняє перерозподіл напружень у навколишніх породах, провокує ріст існуючих тріщин та утворення нових, що призводить до руйнування покрівлі реакторів, непружних деформацій порід покрівлі та притоків підземних вод до реакторів.

Для подолання цих проблем важливим є забезпечення стійкості порід над порожнинами реакторів ПГВ. Аналогічно традиційній видобувній практиці з використанням довгих лав, між реакторами ПГВ необхідно залишати захисні цілики. Розміри і несуча здатність ціликів суттєво впливають на розподіл напружень, непружне деформування порід та зсуви товщі порід і зрушення земної поверхні [12]. Окрім цього цілики є бар'єрами, що запобігають гідравлічним зв'язкам між водоносними горизонтами і виробленим простором. Будь-який гідравлічний зв'язок між реакторами ПГВ робить неконтрольованим процес підтримання тиску, температури та балансу маси рідин в процесі газифікації [3]. Таким чином, параметри захисних ціликів одночасно визначають рівень зрушень товщі покривних порід і земної поверхні, а також продуктивність газогенератора.

Наведений аналіз підтверджує важливість геомеханічного обґрунтування параметрів системи «газогенератор-цілик-покривні породи» для забезпечення контрольованого процесу підземної газифікації з одночасним забезпеченням мінімізації її негативного впливу на покривні породи, водоносні горизонти і об'єкти поверхневої інфраструктури. Тому дослідження впливу ширини запобіжних ціликів на розподіл напружень у покривних породах, величину осідань поверхні та переміщення порід над порожнинами реакторів є актуальною науковою задачею, вирішенню якої присвячене наведене дослідження.

Метою роботи є визначення оптимальних параметрів ціликів, що забезпечують безпечну

реалізацію підземної газифікації вугілля, запобігають руйнуванню порід покрівлі, знижують екологічні ризики та одночасно забезпечують ефективне використання ресурсу вугільного пласта.

Методи та методики дослідження. Опис проєкту. У цьому дослідженні було розглянуто метод паралельного керованого переміщення точки дуття (КПТД) (рис. 1). КПТД є найбільш популярним і сучасним методом реалізації ПГВ. В цьому методі шляхом направленої буріння проводяться дві свердловини, що розгортаються паралельно одна одній у вугільному пласті. Дуттєва свердловина використовується для подачі дуттєвої суміші (кисню, повітря, пари, тощо), а газовідвідну використовується для виведення газу на поверхню. Вони з'єднуються між собою в кінцевій точці, утворюючи первинний реакційний канал. Лайнер з пальником на кінці, що знаходиться всередині дуттєвої свердловини, забезпечує контрольоване переміщення точки подачі дуття по мірі вигазування вугілля і падіння якості газу. Цей метод значно більш ефективний за лінійну схему газифікації з послідовним переміщенням вогневого вибою [13; 14].

У цьому дослідженні основним методом дослідження було чисельне моделювання. Було змодельовано кілька порожнин, що утворились в процесі газифікації з застосуванням методу КПТД. Довжина реактора завжди становила 30 м, а ширина ціликів змінювалась. Було змодельовано два сценарії: у першому ширина захисного цілика становила 15 м, у другому – 3,75 м (рис. 2б), що відповідає

мінімальним і максимальним значенням раціонального діапазону ширини цілика [15-19]. У першому випадку панель газифікації мала 7 порожнин та 6 ціликів (70% вилучення вугілля), у другому випадку – 9 порожнин та 8 ціликів (90% вилучення вугілля). Над газифікаційною порожниною було змодельовано зону обвалення у формі склепіння висотою 8,4 м, що у 8 разів перевищує потужність вугільного пласта [20; 21]. Вироблений простір був заповнений продуктами горіння та обваленими породами покрівлі.

Метою моделювання було дослідження осідання земної поверхні та переміщення гірничого масиву над порожнинами газифікації при різній ширині ціликів. Окрім означених сценаріїв моделювання включало песимістичний сценарій, який демонстрував геомеханічну ситуацію, яка формується у випадку руйнування захисних ціликів між порожнинами реактора та наслідки такої аварії для стійкості покривних порід і земної поверхні.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження в цій роботі була шахта «Котляревська», яка розташована в західно-південній частині Покровського району Донецької області. Наразі видобуток вугілля на шахті зупинено через окупацію території та руйнування наземної інфраструктури. Запаси вугілля шахти містяться у двох пластах I_1 , який розроблявся у довоєнний період, та k_8 , запаси якого майже вичерпані. Залишкові запаси пласта k_8 оцінюються в 34,6 млн тон кам'яного вугілля тому його доцільно розглядати для реалізації проєкту підземної газифікації.

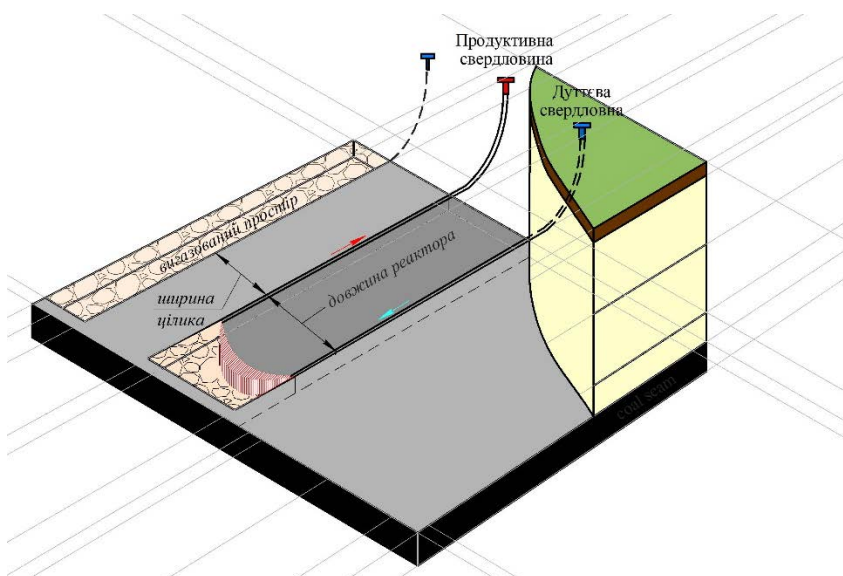


Рис. 1. Метод керованого переміщення точки дуття

Гірничо-геологічні умови шахти типові для південного Донбасу. Потужність вугільного пласта становила 1,05-1,35 м, кут падіння змінювався від 11 до 13 градусів. Безпосередня покрівля вугільного пласта на досліджуваній ділянці представлена слабким аргілітом потужністю до 3,0 м. Основна покрівля – пісковик потужністю до 30 м. Підшва вугільного пласта представлена аргілітом потужністю 3,0 м та алевролітом потужністю до 8,0 м, під яким знаходиться масивний пісковик (Рис. 2а). За панель газифікації вугілля прийнято частину пласта I_1 з довжиною падіння 300 м. Верхня межа згаданої панелі розташована на глибині 392 м, нижня – на глибині 465 м (Рис. 2б).

Гірничий масив у шахтному полі характеризується осадовими відкладеннями пісковиків, алевролітів, аргілітів, вапняків та вугільними пластами. Кам'яновугільна товща знаходиться під чохлам четвертинних та палеоген-неогенових покладів. Палеогенові поклади зустрічаються на кам'яновугільних породах з кутовою невідповідністю і представлені кварцовими пісками, глинами, уламковими породами з прошарками залізистих пісковиків і кварцитів. Неогенові поклади зустрічаються у вигляді окремих масивів у західній та південно-західній частинах Донбасу і представлені переважно глинами та пісками. Четвертинні поклади представлені глинами та суглинками потужністю від 10-20 до 50 м і поширені майже повсюдно.

Опис методу дослідження. Було використано метод скінченних елементів, реалізований у програмному комплексі Ansys, при цьому моделі були тривимірними. На першому етапі моделювання геометричні розміри моделі

становили 900 м у ширину, 620 м у висоту та 100 м у довжину. Бічні межі моделі були зафіксовані від горизонтальних переміщень, нижня межа – від вертикальних, а також враховано дію сили тяжіння.

Шари гірничих порід були об'єднані в групи за критерієм середньозваженої міцності на стиск. Якщо міцність окремого літотипу породи відрізнялася більше ніж на 20% від середнього значення групи, цей літотип виділяли в окрему групу, причому враховувалися лише шари потужністю понад 1,0 м. Після цього процес групування повторювався. Для моделювання поведінки порід використовувалася ортотропна модель, яка дозволяє враховувати анізотропні властивості осадових порід [22-24]. Зміна фізико-механічних властивостей гірничих порід вздовж та впоперек шаруватості визначалася за допомогою калібрувальної числової моделі відповідно до методики, запропонованої Сахно та ін. [25]. Отримані результати калібрування загалом узгоджуються з висновками проф. Ржевського.

Результати.

Песимістичний сценарій. На рис. 3 показано еволюцію вертикальних переміщень у моделі під час покрокового моделювання просідання поверхні та зсуву гірничого масиву над панеллю газифікації. Вертикальний масштаб переміщень на рис. 3 становить 1:20. Відповідно до песимістичного сценарію всі порожнини в панелі були відпрацьовані, а захисні цілики зруйнувалися, не витримавши навантаження. Таким чином, механізми просідання поверхні та переміщення гірничого масиву спрощуються до аналогічних механізмів, характерних для очисного виймання лавами.

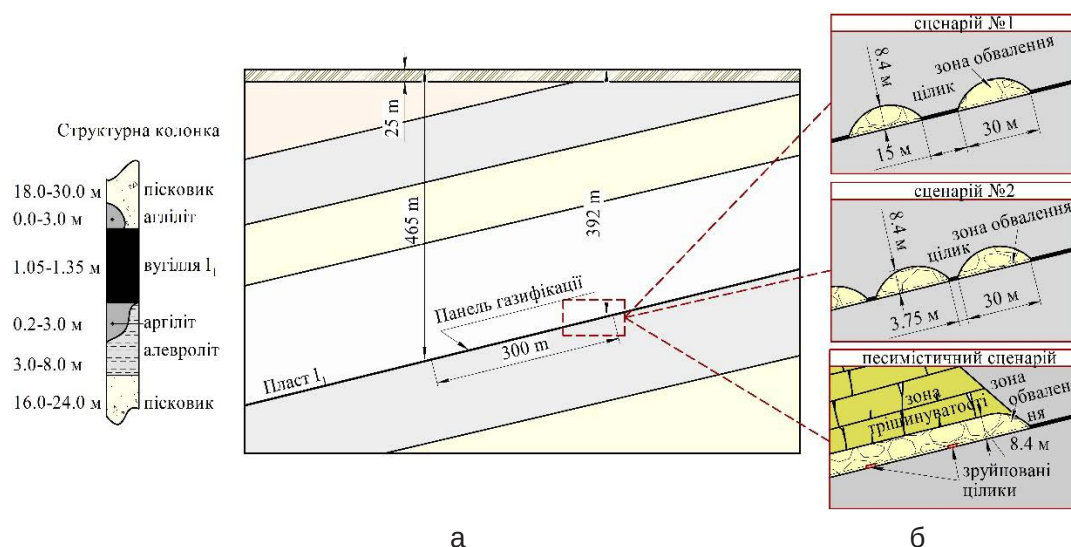


Рис. 2. Геологічні та інженерні умови газифікації:
(а) структурна колонка пласта; (б) схема розташування панелі газифікації

Цю модель було використано для остаточного калібрування властивостей гірничих порід. Для цього результати розрахунку просідання поверхні в моделі порівнювали з результатами моніторингу просідання над південною лавою пласта I_1 шахти «Котляревська». Процедура також описана в роботі [20]. Відповідні графіки просідання поверхні показано на рис. 4. Як видно з рис. 4, після калібрування чисельної моделі графік кривої просідання поверхні близький до кривої просідання, отриманої за результатами моніторингу.

Максимальне вертикальне переміщення в чисельній моделі становить 543 мм, тоді як за даними моніторингу – 550 мм. Ширина мульди осідання в чисельній моделі становить 660 м, а за результатами моніторингу – 630 м.

Точність числової моделі оцінювалася на основі вимірювань похибки. Відсоткова похибка для максимального осідання становила 1,27%, а для ширини мульди осідання – 4,72%.

Отримані показники похибки свідчать про достатню точність моделі.

Вертикальні та горизонтальні переміщення гірського масиву на глибинах 100, 200 і 300 м, а також на поверхні для песимістичного сценарію наведені на рис. 5.

Аналіз результатів моделювання показує, що осідання поверхні та переміщення гірничого масиву перевищують граничні значення, характерні для пружного вигину шарів без їх руйнування. Це свідчить про високий ризик розриву суцільності перекриваючих порід, утворення тріщин над панеллю газифікації, зміни режиму гідрологічного режиму ґрунтових вод та значного притоку води в порожнини газифікації. Таким чином, руйнування ціликів між порожнинами реактора становить загрозу для наземної інфраструктури та стабільності режиму ґрунтових вод, що обумовлює необхідність детального обґрунтування параметрів захисних ціликів при проектуванні технології ПГВ.

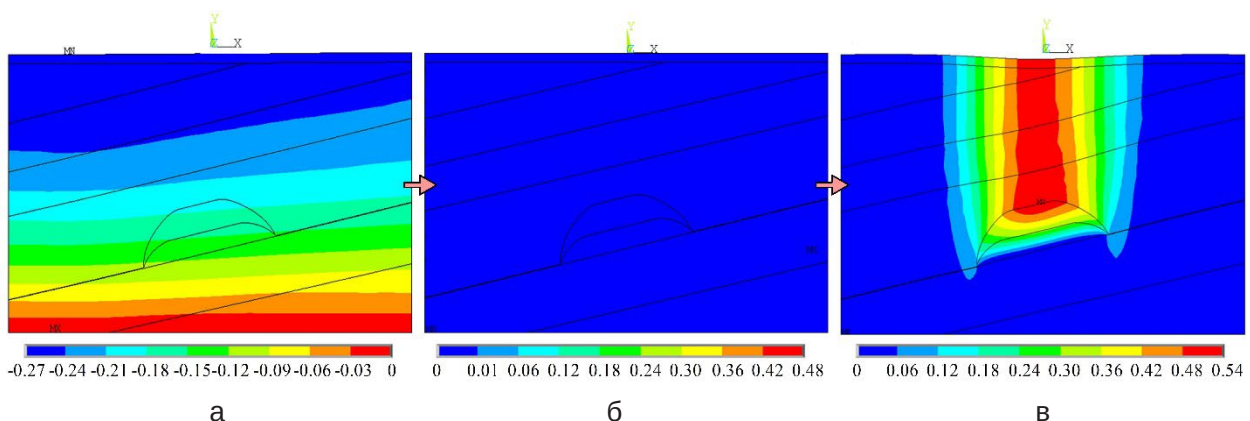


Рис. 3. Еволюція вертикального переміщення в послідовності процесу моделювання за песимістичним сценарієм: (а) Крок 1 (стадія попереднього напруження); (б) Крок 2 (стадія початкового напруження – деформації); (в) Крок 3 (стадія після газифікації)

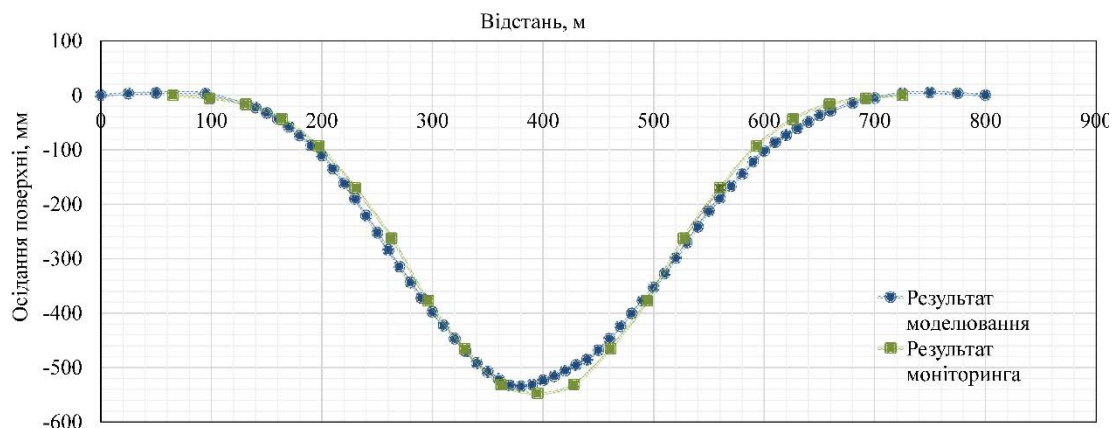


Рис. 4. Просідання поверхні відповідно до результатів моделювання та моніторингу (песимістичний сценарій)

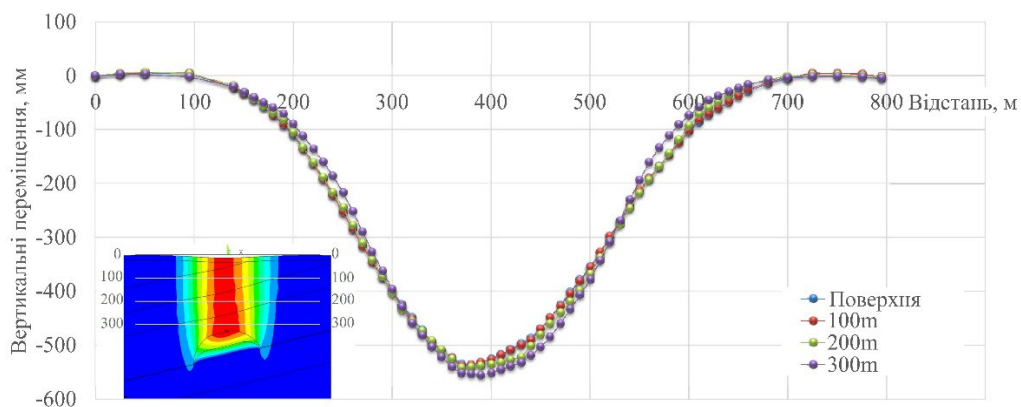
Перший та другий сценарій. На рис. 6 наведено вертикальні переміщення в моделі над панеллю газифікації за сценарієм №1 та сценарієм №2. Вертикальний масштаб переміщень на рис. 6 становить 1:20. Точки максимальних вертикальних переміщень розташовані в центральній частині панелі газифікації. Графіки вертикальних та горизонтальних переміщень поверхні та гірничого масиву на глибинах 100, 200 та 300 м наведені на рис. 7. Аналіз цих графіків показує, що переміщення порід є незначними. Просідання поверхні не перевищує 27 мм у сценарії №1 та 46 мм у сценарії №2, при цьому вертикальне зміщення незначно зростає з глибиною (рис. 7а, в).

В обох сценаріях (№1 і №2) встановлено, що горизонтальні переміщення на поверхні перевищують їх значення на глибині, окрім цього відсутня тенденція до зростання горизонтальних переміщень із глибиною. Як у сценарії №1, так і у сценарії №2, на глибині 100 м горизонтальні переміщення близькі до нуля, далі незначно

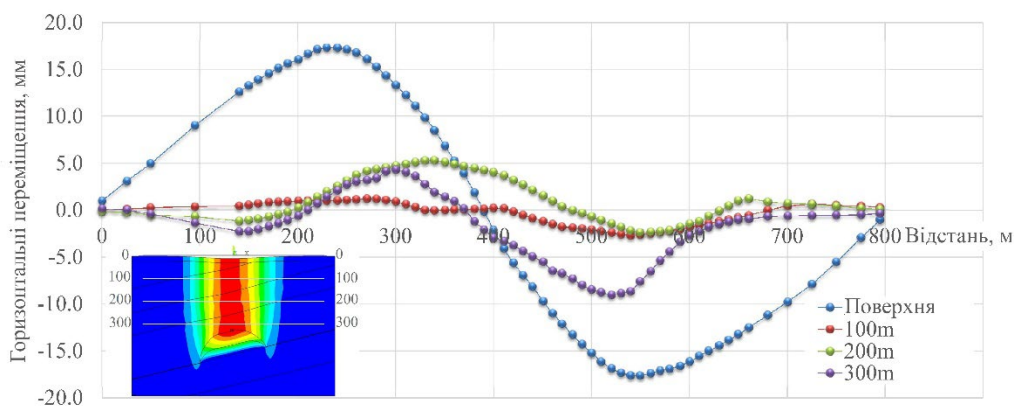
зростають на глибині 200 м і знову зменшуються на глибині 300 м. Вісь переміщень зміщується вправо (у напрямку підняття пластів на глибинах 100-200 м), а потім повертається до початкового положення на глибинах 200-300 м. Отримані результати свідчать про низьку ймовірність утворення тріщин у гірському масиві та на поверхні.

Найбільш інтенсивні переміщення не виходять за межі основної покрівлі (рис. 6). Це також підтверджується аналізом розподілу мінімальних головних напружень (рис. 8). Якщо не враховувати напруження в ціликах на межах панелі газифікації, руйнування гірничого масиву та земної поверхні в обох сценаріях є мало ймовірним, оскільки напруження, що утворюються в породах, значно нижчі за їхню граничну міцність. Напруження на висоті 70 м над панеллю газифікації не відрізняються від напружень у гірничому масиві поза зоною впливу газифікації.

Що стосується напружень у ціликах, їх максимальні значення спостерігаються в центральній



а



б

Рис. 5. Вертикальні (а) та горизонтальні (б) переміщення гірничого масиву і земної поверхні в песимістичному сценарії

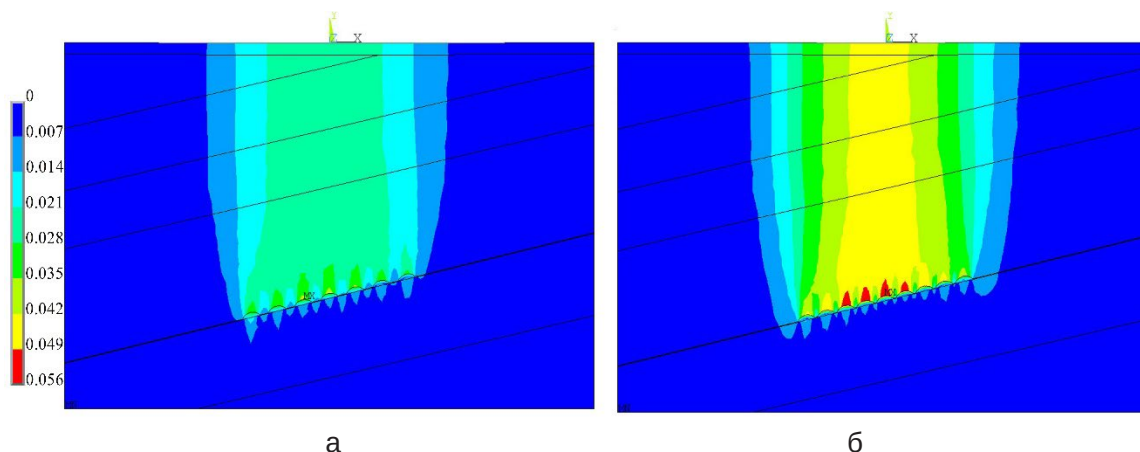


Рис 6. Розподіл вертикальних переміщень: (а) сценарій №1; (б) сценарій № 2

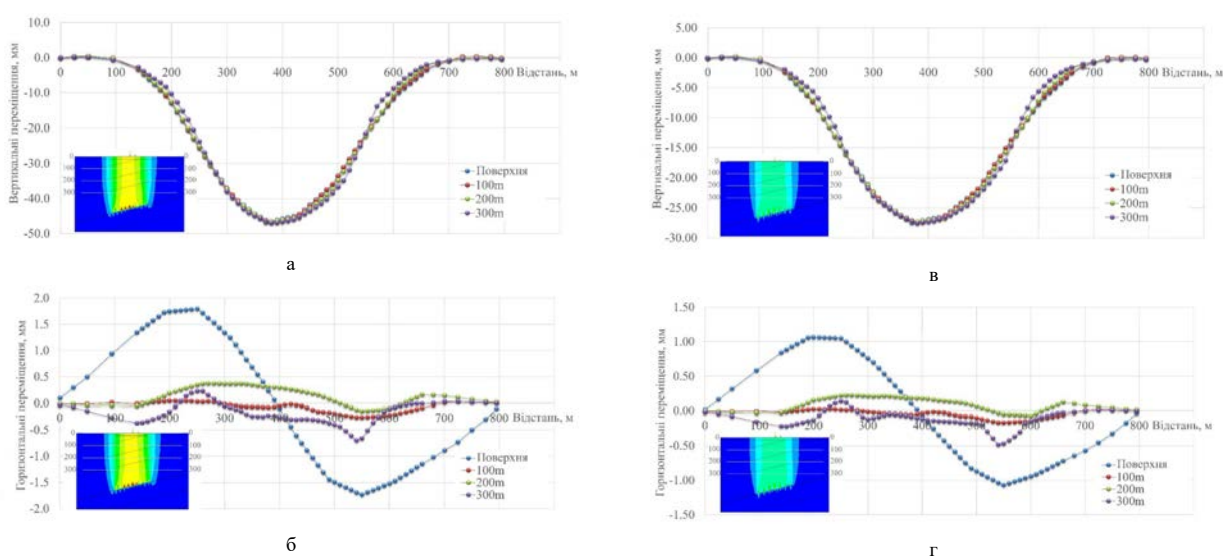


Рис. 7. Вертикальні та горизонтальні зміщення гірських порід та земної поверхні за сценарієм №1 (а, б); сценарієм №2 (в, г)

частині панелі газифікації (рис. 8). За результатами першого етапу моделювання в обох сценаріях напруження перевищують граничну межу міцності гірничих порід. Так, за сценарієм №1 максимальні стискальні напруження становлять 86,6 МПа, а за сценарієм №2 – 109 МПа.

Обговорення. За результатами проведеного аналізу можна зробити наступні висновки. Під час підземної газифікації тонкого вугільного пласта (потужністю 1,05 м) на глибині 392-465 м методом КПТД при довжині вогневого вибою 30 м за сценарієм №1 та сценарієм №2 осідання земної поверхні та переміщення гірничого масиву є незначними. Найбільш інтенсивні переміщення локалізуються над порожниною вигазовування в межах основної покрівлі. Аналіз вертикальних та горизонтальних переміщень

свідчить про низьку ймовірність утворення тріщин у гірському масиві та на земній поверхні. Однак, передумовою для цього є забезпечення стійкості ціликів між порожнинами вигазовування.

У разі руйнування ціликів між порожнинами вигазовування (песимістичний сценарій) існує висока ймовірність виникнення тріщин та руйнування порід розкриву. Аналіз вертикальних та горизонтальних переміщень показує, що в такому випадку осідання поверхні та деформації масиву перевищують граничні значення, характерні для безрозривного вигину шарів. Це створює загрозу для наземної інфраструктури, а також може призвести до руйнування водонесних пісковиків і проривів води в газифікаційні порожнини.

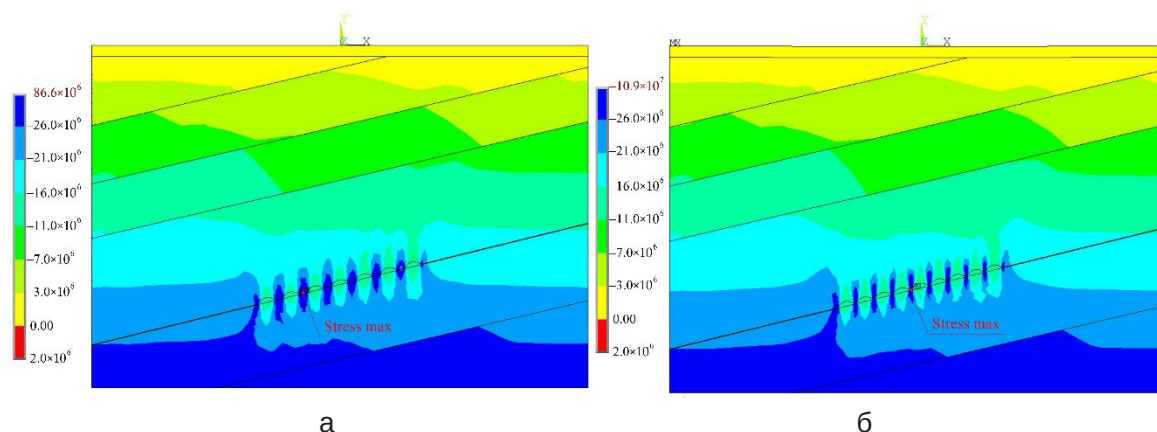


Рис. 8. Розподіл мінімальних головних напружень: (а) сценарій №1; (б) сценарій №2

Максимальні стискаючі напруження локалізуються в ціликах розташованих в центральній частині панелі газифікації, при цьому головні напруження перевищують граничну міцність порід. Водночас для обґрунтованої оцінки стійкості ціликів необхідне більш детальне масштабне дослідження з урахуванням усіх припущень. Таке дослідження буде метою подальших досліджень авторів.

Висновки. Це дослідження зосереджено на визначенні негативного впливу ПГВ на розкриті породи та земну поверхню. Було досліджено підземну газифікацію тонкого вугільного пласта паралельним методом КПТД. Для вивчення напружено-деформованого стану та розподілу температури в навколишніх породах було використано метод скінченних елементів реалізований в ANSYS.

На основі результатів цього дослідження

встановлено, що осідання поверхні та переміщення порід над порожниною вигазовування знаходяться у допустимих межах у випадку збереження несучої здатності запобіжних ціликів. Це забезпечує низьку ймовірність негативного впливу газифікації. Для умов цього дослідження, газифікації вугільного пласта товщиною 1,05 м на глибині 392–465, вертикальні осідання поверхні не перевищувало 46 мм при ширині цілика 3,75 м та 27 мм при ширині цілика 15,0 м. У цьому випадку висота області зміни напружень над порожниною газифікації не перевищує 70 м. Руйнування ціликів між порожнинами вигазовування призводить до збільшення осідання в 11,7 та 19,9 рази для ширини ціликів 3,75 та 15,0 м відповідно. Переміщення розкритих порід збільшується аналогічним чином, що ставить під загрозу суцільність водоносних горизонтів та наземну інфраструктуру.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Klimenko A. Early Ideas in Underground Coal Gasification and Their Evolution. *Energies*. 2009. Vol.2 (2). P. 456–476. <https://doi.org/10.3390/en20200456>
2. Shafirovich E., Varma A. Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2009. Vol. 48, no. 17. P. 7865–7875. <https://doi.org/10.1021/ie801569r>
3. Burton E., Friedmann J., Upadhye R. Best practices in underground coal gasification (Contract No. W-7405-Eng-48). Lawrence Livermore National Laboratory. 2006.
4. Couch G. Underground coal gasification (CCC/151). IEA Clean Coal Centre. 2009.
5. Sarhosis V., Yang D., Sheng Y., Kempka T. Coupled hydro-thermal analysis of underground coal gasification reactor cool down for subsequent CO₂ storage. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 40. P. 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.049>
6. Sury M., White M., Lucas C. Review of underground coal gasification technologies and practices. DTI Cleaner Coal Technology Programme. 2004.
7. Imran M., Kumar D., Kumar N., Qayyum A., Saeed A. Environmental concerns of underground coal gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 31. P. 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.025>
8. Najafi M., Jalali S. M. E., KhaloKakaie, R. Thermal– mechanical– numerical analysis of stress distribution in the vicinity of underground coal gasification (UCG) panels. *International Journal of Coal Geology*. 2014. Vol. 134. P. 1–16.
9. Sirdesai N. N., Singh R., Singh T. N., Ranjith P. G. Numerical and experimental study of strata behavior and land subsidence in an underground coal gasification project. *Proc. IAHS*. 2016. Vol. 372. P. 455–462. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-455-2015>

10. Akbarzadeh H., Chalaturnyk R. J. Structural changes in coal at elevated temperature pertinent to underground coal gasification: A review. *International Journal of Coal Geology*. 2014. Vol. 131. P. 126–146. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.06.009>
11. Buscheck T. E., Kuder T., Philip R., Kolhatkar R., Klinchuch L. Two-dimensional compound-specific isotope analysis to assess remediation system effectiveness, in situ and on-site bioremediation. *Tenth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium*. Baltimore, MD, United States, 2009.
12. Corkum A. G., Board M. P. Numerical analysis of longwall mining layout for a Wyoming trona mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016. Vol. 89. P. 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.09.001>
13. Seifi M., Chen Z., Abedi J. Large scale simulation of UCG process applying porous medium approach. *Can. J. Chem. Eng.* 2015. Vol. 93. P. 1311–1325. <https://doi.org/10.1002/cjce.22218>
14. Lozynskyi V., Falshtynskyi V., Kozhantov A., Kieush L., Saik P. Increasing the underground coal gasification efficiency using preliminary electromagnetic coal mass heating. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2024. Vol. 1348. P. 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012045/>
15. Wang X., Zhang Q., Yuan L. A coupled thermal-force-chemical-displacement multi-field model for underground coal gas-ification based on controlled retraction injection point technology and its thermal analysis. *Energy*. 2024. Vol. 130614. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130614>
16. Yang D., Sarhosis V., Sheng Y. Thermal–mechanical modelling around the cavities of underground coal gasification. *Journal of the Energy Institute*. 2014. Vol. 87(4). P. 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.029>
17. Zha X.X., Wang H.Y., Cheng S.S. Finite element analysis of the subsidence of cap rocks during underground coal gasi-fication process. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 859. P. 91–94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.859.91>
18. Lee K., Nam J., Park J., Hong G. Numerical Analysis of Factors Influencing the Ground Surface Settlement above a Cavity. *Materials*. 2022. Vol. 15(23). P. 8301. <https://doi.org/10.3390/ma15238301>
19. Liu X., Xu L., Zhang K. Strata movement characteristics in underground coal gasification (UCG) under thermal coupling and surface subsidence prediction methods. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(8). P. 5192. <https://doi.org/10.3390/app13085192>
20. Sakhno I., Sakhno S., Petrenko A., Barkova O., Kobylanskyi B. Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2023. Vol. 1254. P. 012057. <https://doi.org/10.3390/app14135733>
21. Zhang C., Tu S., Zhao Y. Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf: A review. *Environmental Earth Sciences*. 2019. Vol. 78. P. 27. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8037-7>
22. Barla G. Rock anisotropy: Theory and laboratory testing. *Rock mechanics* / ed. by L. Müller. Springer-Verlag. 1972. P. 131–169.
23. Cazacu O., Cristescu N.D., Sha J.F., Henry J.P. A new anisotropic failure criterion for transversely isotropic solids. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*. 1998. Vol. 3. P. 89–103.
23. Oka F., Kimoto S., Kobayashi H., Adachi T. Anisotropic behavior of soft sedimentary rock and a constitutive model. *Soils and Foundations*. 2002. Vol. 42 (5). P. 59–70.
24. Khanlari G., Rafiei B., Abdilor Y. Evaluation of strength anisotropy and failure modes of laminated sandstones. *Arab J Geosci.* 2015. Vol. 8(5). P. 3089–3102. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1411-1>
25. Sakhno I.G., Molodetskyi A.V., Sakhno S.V. Identification of material parameters for numerical simulation of the behavior of rocks under true triaxial conditions. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. Vol. 5. P. 48–53. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/4>

REFERENCES:

1. Klimenko, A. Y. (2009). Early ideas in underground coal gasification and their evolution. *Energies*, 2(2), 456–476. <https://doi.org/10.3390/en20200456>
2. Shafirovich, E., & Varma, A. (2009). Underground coal gasification: A brief review of current status. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(17), 7865–7875. <https://doi.org/10.1021/ie801569r>
3. Burton, E., Friedmann, J., & Upadhye, R. (2006). *Best practices in underground coal gasification* (Contract No. W-7405-Eng-48). Lawrence Livermore National Laboratory.
4. Couch, G. (2009). *Underground coal gasification* (CCC/151). IEA Clean Coal Centre.
5. Sarhosis, V., Yang, D., Sheng, Y., & Kempka, T. (2013). Coupled hydro-thermal analysis of underground coal gasification reactor cool down for subsequent CO₂ storage. *Energy Procedia*, 40, 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.049>

6. Sury, M., White, M., & Lucas, C. (2004). *Review of underground coal gasification technologies and practices*. DTI Cleaner Coal Technology Programme.
7. Imran, M., Kumar, D., Kumar, N., Qayyum, A., & Saeed, A. (2014). Environmental concerns of underground coal gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.025>
8. Najafi, M., Jalali, S. M. E., & KhaloKakaie, R. (2014). Thermal–mechanical– numerical analysis of stress distribution in the vicinity of underground coal gasification (UCG) panels. *International Journal of Coal Geology*, 134, 1-16
9. Sirdesai, N. N., Singh, R., Singh, T. N., & Ranjith, P. G. (2016). Numerical and experimental study of strata behavior and land subsidence in an underground coal gasification project. *Proc. IAHS*, 372, 455–462. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-455-2015>
10. Akbarzadeh, H., & Chalaturnyk, R. J. (2014). Structural changes in coal at elevated temperature pertinent to underground coal gasification: A review. *International Journal of Coal Geology*, 131, 126–146. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.06.009>
11. Buscheck, T. E., Kuder, T., Philip, R., Kolhatkar, R., & Klinchuch, L. (2009). Two-dimensional compound-specific isotope analysis to assess remediation system effectiveness, in situ and on-site bioremediation. *Paper presented at the Tenth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium*, Battelle Memorial Institute, Baltimore, MD, United States.
12. Corkum, A. G., & Board, M. P. (2016). Numerical analysis of longwall mining layout for a Wyoming trona mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 89, 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.09.001>
13. Seifi, M., Chen, Z., & Abedi, J. (2015). Large scale simulation of UCG process applying porous medium approach. *Can. J. Chem. Eng.* 93, 1311–1325. <https://doi.org/10.1002/cjce.22218>
14. Lozynskyi, V., Falshtynskyi, V., Kozhantov, A., Kieush, L., & Saik, P. (2024). Increasing the underground coal gasification efficiency using preliminary electromagnetic coal mass heating *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1348, 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012045/>
15. Wang, X., Zhang, Q., & Yuan, L. (2024). A coupled thermal-force-chemical-displacement multi-field model for underground coal gas-ification based on controlled retraction injection point technology and its thermal analysis. *Energy*, 130614. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130614>
16. Yang, D., Sarhosis, V., & Sheng, Y. (2014). Thermal–mechanical modelling around the cavities of underground coal gasification. *Journal of the Energy Institute*, 87(4), 321-329. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.029>
17. Zha, X.X., Wang, H.Y., & Cheng, S.S. (2014). Finite element analysis of the subsidence of cap rocks during underground coal gasi-fication process. *Advanced Materials Research*, 859, 91-94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.859.91>
18. Lee, K., Nam, J., Park, J., & Hong, G. (2022). Numerical Analysis of Factors Influencing the Ground Surface Settlement above a Cavity. *Materials*, 15(23), 8301. <https://doi.org/10.3390/ma15238301>
19. Liu, X., Xu, L., & Zhang, K. (2023). Strata movement characteristics in underground coal gasification (UCG) under thermal coupling and surface subsidence prediction methods. *Applied Sciences*, 13(8), 5192. <https://doi.org/10.3390/app13085192>
20. Sakhno, I., Sakhno, S., Petrenko, A., Barkova, O., & Kobylanskyi, B. (2023). Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1254, 012057. <https://doi.org/10.3390/app14135733>
21. Zhang, C., Tu, S., & Zhao, Y. (2019). Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf: A review. *Environmental Earth Sciences*, 78, 27. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8037-7>
22. Barla, G. (1972). Rock anisotropy: Theory and laboratory testing. In L. Müller (Ed.), *Rock mechanics* (pp. 131–169). Springer-Verlag.
23. Cazacu, O., Cristescu, N.D., Shao, J.F., & Henry, J.P. (1998). A new anisotropic failure criterion for transversely isotropic solids. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 3, 89-103.
23. Oka, F., Kimoto, S., Kobayashi, H., & Adachi, T. (2002). Anisotropic behavior of soft sedimentary rock and a constitutive model. *Soils and Foundations*, 42 (5), 59-70.
24. Khanlari, G., Rafiei, B., & Abdilor, Y. (2015). Evaluation of strength anisotropy and failure modes of laminated sandstones. *Arab J Geosci.*, 8(5), 3089-3102. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1411-1>
25. Sakhno, I.G., Molodetskyi, A.V., & Sakhno, S.V. (2018). Identification of material parameters for numerical simulation of the behavior of rocks under true triaxial conditions. *Naukovyi Visnyk NHU*, 5, 48–53. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/4>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 08.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 239.42:622.35

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-30>

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПРЯМОВАНОГО РУЙНУВАННЯ КРИСТАЛІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА В КОМБІНОВАНОМУ РЕЖИМІ

Тітов Данил Андрійович,

аспірант кафедри відкритих гірничих робіт
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-0637-2329

Кальчук Сергій Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент
Державного університету «Житомирська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3179-2787

Робота присвячена математичному моделюванню процесу спрямованого руйнування гірської породи в режимі комбінованого навантаження: при сполученні статичного напруження середовища до рівня, передуючого інтенсивному некерованому за напрямом розростанню в ньому мікротріщин, за допомогою невибухових руйнуючих сумішей (НПС), і з остаточним розколюванням по заданій площині субдинамічним нарощуванням напружень піроклинами. За даного режиму забезпечується повільне (7-20 годин) нарощування напружень до критичного рівня, понад якого в кристалічних середовищах починається спонтанний розвиток тріщин за типом ланцюгової реакції з повним псуванням блоків цінної продукції, запобігти чому передбачається на основі ідеї використання субдинамічної дії піроклина як тригера короткоповільного утворення відділяючої блок магістральної площини по лінії, заданій попередньо пробуреними в породі свердловинами або шпурами. Актуальність роботи зумовлена тим, що на практиці означена ідея цілком переконливо підтверджує свою доцільність, але потребує розробки відповідного теоретичного обґрунтування.

Методично це пропонується на основі структурних і безструктурних моделей, із застосуванням надійно апробованого статистичного розподілу Вейбулла. За цих умов передбачається системний комплексний підхід щодо побудови моделей процесу розвитку напружено-деформованого стану з мікро- та макроруйнуванням кристалічних порід. Встановлено, що формування тріщин відділення блоків мають відповідати анізотропії породних масивів. Обґрунтовано, що, оскільки процеси росту магістральних тріщин протікають за різними законами в звичайній та субдинамічній постановці задачі руйнування, їх доцільно описувати аналітично з комплексно-системним урахуванням синергетичної дії, що підвищить адекватність розроблених моделей.

Ключові слова: кристалічне середовище, природний камінь, руйнування породи, розколювання, напруження, динаміка, математична модель.

Titov Danil, Kalchuk Sergii. Mathematical modeling of directed destruction of crystalline medium in combined mode

The work is devoted to mathematical modeling of the process of directional fracture of rock in the combined loading mode: when combining static stress of the medium to a level preceding intensive uncontrolled growth of microcracks in it, using non-explosive destructive mixtures (NDM), and with final splitting along a given plane by subdynamic stress buildup by pyroclines. This mode provides a slow (7-20 hours) build-up of stresses to a critical level, above which spontaneous development of cracks begins in crystalline media by the type of chain reaction with complete damage to blocks of valuable products, which is expected to be prevented based on the idea of using the subdynamic action of pyrocline as a trigger for the short-delayed formation of a main plane separating the block along a line previously drilled in the rock by wells or boreholes. The relevance of the work is due to the fact that in practice the indicated idea quite convincingly confirms its feasibility, but requires the development of an appropriate theoretical justification.

Methodologically, this is proposed on the basis of structural and structureless models, with the use of reliably tested Weibull statistical distribution. Under the second conditions, a systematic complex approach is envisaged to build models of the process of development of the stress-strain state with micro- and macro-fracture of crystalline rocks.

The findings indicate that the formation of cracks separating blocks should correspond to the anisotropy of rock massifs. It is substantiated that, since the processes of growth of main crack proceed according to different laws in the usual and subdynamic formulation of the fracture problem, it is advisable to describe them analytically with a complex-system account of the synergistic action. Which will increase the adequacy of the developed models.

Key words: crystalline medium, natural stone, rock failure, splitting, stress, dynamics, mathematical model.

Вступ. Наразі гірничодобувна промисловість України, незважаючи на її інертність, доволі стрімко еволюціонує і останнє має конкретно регресивний характер, що зумовлюється насамперед негативними геополітичними процесами та тривалою війною з РФ, а також – радикальними змінами, як у світовій географії ресурсно-лідуючих центрів, так і в сировинних пріоритетах новітніх, насамперед ІТ-технологій на глобальному рівні, коли, за стрімкого розвитку рециклінгу металобрухту й уповільнення обсягів механічного виробництва, рудна частка в металургії чорних металів стабілізується, а подекуди навіть скорочується, все чіткіше виявляючи тенденції до розвороту гірництва від домінуючої нині залізорудної сировини до руд кольорових металів та рідкоземельних елементів. Не останню роль також у цьому відіграють і процеси розвитку урбаністики, коли в містобудуванні останнім часом радикально змінюються критерії архітектурно-естетичної якості будівель і спорудз переходом від прагматично-масового будівництва до індивідуалізовано вираженого творчого, яке є неможливим без високоякісних, довговічних оздоблювальних матеріалів, серед яких абсолютний пріоритет на усіх континентах належить природному каменю, і яким надзвичайно багатими є надра України.

Тому наведені вище обставини мають закладатися у фундамент промислової стратегії України стосовно сировинного її спрямування, щоб зберегти функціонування гірничодобувного комплексу як основи державної економіки й індустрії. Це є найбільш реальним шляхом виживання галузі за сучасної кризи, так як уможлиблюється високою адаптивною здатністю кар'єр-систем, навіть таких вузькоспеціалізованих об'єктів, як ГЗК, до відносно швидкої конверсії виробництва з широкою диверсифікацією мінеральної продукції за рахунок переходу до комплексного освоєння надр, з яких побіжно і неминуче видобуваються мільйони кубометрів сировини, подекуди набагато ціннішої за залізну руду (1 м³ граніту, наприклад, коштує \$500-900), але яка безповоротно втрачається у змішаних відвалах, повністю зіпсована вибуховими рудними технологіями.

Актуалізація розглянутої проблеми зумовлюється саме технологічними чинниками, враховуючи особливу вразливість блокової сировини до методів вилучення з масивів, що й вмотивувало дане дослідження.

Сама ж технологія спрямованого руйнування каменю по заданим площинам відома з давніх часів і принципи її багато в чому збереглися до наших днів, адже древні люди, як і зараз,

видобували в породі ряди отворів для напруження її по площині відколу, тільки робили це за допомогою забивання дерев'яних кілків з наступним змочуванням їх для набухання. Сучасні аналогі й наразі є найбільш поширеними способами щадного виколування кам'яних блоків, тільки шпури або свердловини в породі вибураються високопродуктивними верстатами, а замість дерев'яних кілків використовуються або механізовані клинові пристрої (гідроклини, піроклини тощо), або твердіючі з розширенням невибухові руйнуючі суміші (НРС) чи генератори тиску хімічних речовин (ГТХ) – «повільного вибуху». Але загалом на більшості гранітних кар'єрів завдяки своїй технологічній простоті превалює відбивання блоків з допомогою буро-вибухових робіт (БВР) із застосуванням шпурового буріння в сполученні з пороховими зарядами. Однак даний спосіб, навіть при використанні не бризантних а металевих зарядів димного пороху, не виключає вибухове ушкодження цінної продукції, до того ж порох здатний до самозаймання від тертя з породою при заряджанні шпурів. Існує декілька й умовно неруйнуючих способів видобутку, але вони обмежуються або незначними розмірами блоків (нарізання дисковими пилами), або низькою продуктивністю та відносною складністю окремих операцій (відрізання крупних блоків канатними пилами), або високою витратністю та відходністю (суцільне прорізання відокремлюючих щілин термоструменевими пальниками).

Усі зазначені способи характеризуються різною динамікою процесу протікання створюваних зусиль розколу [1], що є головним чинником забезпечення якості продукції, тому цільовим завданням даного дослідження є пошук прийняттого оптимуму (компромісу між витратами технологічними та втратами сировинними) шляхом аналізу ефективності сполучення варіацій розглянутих способів, у даному випадку – поєднання НРС з піроклинами.

Методи та методики дослідження. Методологічно дане дослідження реалізується шляхом однооб'єктного паралельного моделювання розвитку напружено-деформованого стану кристалічного пружно-крихкого мінерального середовища в режимах статичного (НРСами) та субдинамічного (піроклинами) його навантаження. Розроблене рішення вже підтвердило свою ефективність, але в промисловій практиці впровадження на вітчизняних кар'єрах не набуває внаслідок відсутності належного та доступного для інженерного користування методологічного забезпечення, враховуючи, що воно йде набагато далі не тільки прикладних задач

гірничого виробництва, але й суттєво розширює можливості самої геомеханіки.

Існуючі методики розрахунку параметрів технології спрямованого відколу переважно базуються на теорії статичного руйнування порід, що є гальмом для технологій видобування каменю методами, відмінними від статичних. Тому розробка математичної моделі, що адекватно описує протікання процесів комбінованого спрямованого руйнування каменю в двостадійному режимі та визначення основних етапів цих процесів за означених умов має вельми актуальне значення.

Більшість з існуючих теорій забезпечують достовірність лише для обмеженої групи порід, а для опису динаміки процесу руйнування кристалічного облицювального каменю є не достатньо адекватними, оскільки не враховують повною мірою системно складних процесів комбінованого руйнування полімінерального середовища, які вимагають враховувати ще й анізотропні його властивості. Тому, враховуючи зазначене, постає необхідність удосконалення математичного моделювання процесів спрямованого руйнування каменю, які об'єднують процеси мікро- та макроруйнування, а також утворення магістральних тріщин в субдинамічній постановці задачі. Саме тому на першому етапі дослідження було проаналізовано нові методики щодо розколювання блочного масиву з допомогою НРС та виділено найефективніші

з них [2]; на другому – визначено особливості крихкого руйнування природного каменю як функції часу (тривалості) в даному контексті субдинамічної задачі на основі енергетичної теорії Журкова. Третій етап обґрунтовує логіку ідеї комбінованого сполучення різних режимів спрямованого руйнування каменю й параметричної оптимізації процесу, після чого слідує конструктивна розробка реалізації метода.

Такий методологічний підхід дозволив виділити найбільш сумісні між собою варіанти режимів статичного та субдинамічного навантаження кристалічного середовища і розробити технічне рішення задачі спрямованого його руйнування в комбінованому режимі, ефективність якого полягає в максимізації монолітності й мінімізації втрат блокової продукції.

Результати та дискусії. Конкретно задача дослідження стосується нового способу відокремлення кам'яних блоків від масиву (рис. 1), який полягає в попередньому напруженні масиву НРС, розміщених у вибурених по площині заданого розколу шпурах, але не до рівня напруг відколу (близько до якого починають стрімко некеровано розростатися мікротріщини, псуочи блок), а до моменту початку такого роду «ланцюгової реакції», після чого спрацюють піроклини і забезпечують появу магістральної тріщини чітко по заданій площині уже в субдинамічному режимі.

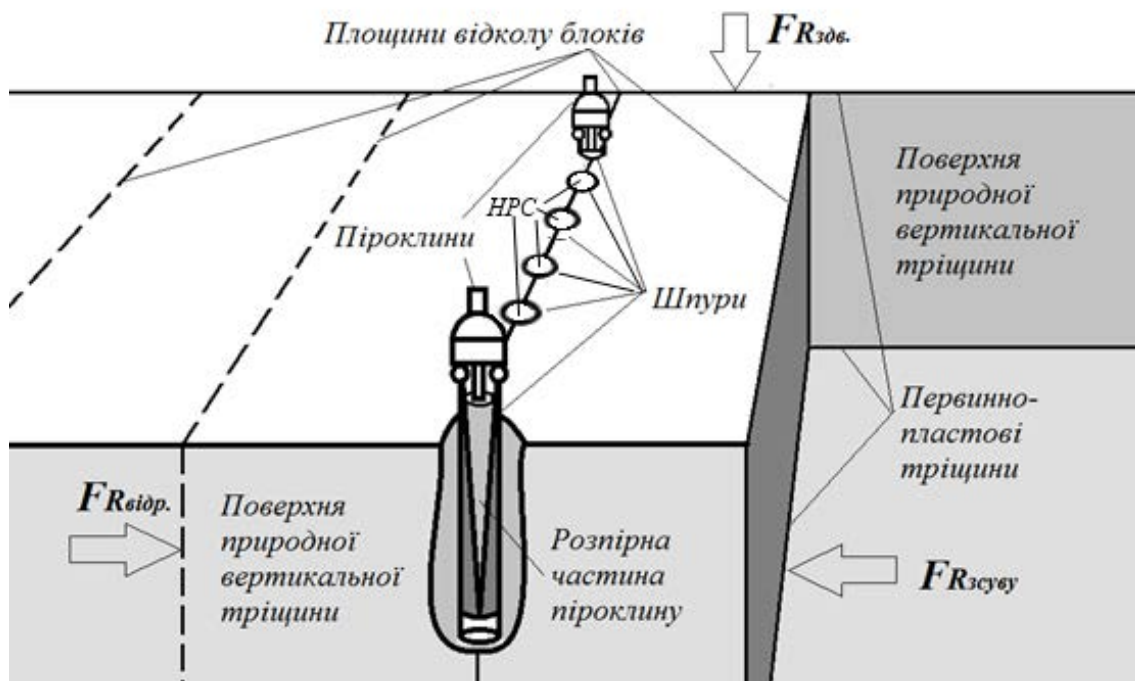


Рис. 1. Просторова орієнтація природних і штучних площин в породному масиві та схема шпурів за комбінованого способу видобутку блоків

Як відзначалося вище, перший етап стосується статичної фази навантаження породи з допомогою НРС, і тут ми спираємося на достатньо прості й одночасно надійні підходи, наведені в [3].

На сьогоднішній день відомими є понад 120 різних сумішей та композицій НРС [4-6], головними недоліками більшості з яких є їх імпортованість, ноу-хау складу, використання як добавок рідкісних і дорогих речовин, тривалий час руйнування (12-24 год.), обмежений температурний режим та умови застосування тощо. У зв'язку з цим ми й звернулися до [3], де враховано необхідність розробки дешевої та якісної НРС з використанням компонентів із місцевої сировини з меншою витратою часу на руйнування гірських порід.

Методично в роботі [3] використано результати теоретичних, лабораторних й експериментальних досліджень із застосуванням теорії систем і системного аналізу, математичного моделювання, теорії створення високого внутрішнього тиску в шпурах тощо. Аналітично застосовується теорія Гріффітса-Ірвіна, і це є цілком виправданим, так як вона не вимагає великої кількості експериментальних даних для розрахунку і задовільно описує руйнування породи за рахунок розростання одиночної тріщини в магістральну [7; 8], що дає підставу вибрати оптимальне просторове положення площини відколу.

При використанні НРС первинні тріщини можуть утворюватися у довільному місці шпуру та розвиватися у будь-якому напрямі. Тому розгляд утворення щілини виключно як результат дії тангенціальної напруги σ_θ в точці А, розташованій в площині щілини на рівній відстані від сусідніх шпурів (рис. 2) без урахування надзвичайно важливої властивості, притаманної усім без винятку гірським породам, – механічної анізотропності й тісно пов'язаної з нею системної тріщинуватості, на наш погляд, є не зовсім коректним, оскільки первинні мікротріщини – це саме ті концентратори напружень, які головним чином і провокують розростання їх до макrorівня, природним результатом чого зрештою й стають системні тріщини.

До речі, при видобутку природного каменю системну тріщинуватість масиву завжди використовують продуктивно, формуючи по них площини відокремлення блоків. До того ж в модель закладається ортогональний принцип взаємного положення тривимірних площин, що реалізується дуже рідко: коректніше мову вести про субортогональні побудови, просторову геометрію яких доволі просто визначати, наприклад, за теоремою косинусів тощо.

В цілому ж є прийнятним твердження, що істотну роль в механізмі формування магістральної щілини відіграють радіальні напруги від сусідніх шпурів, які геометрично складаються в площині, що перетинає її перпендикулярно

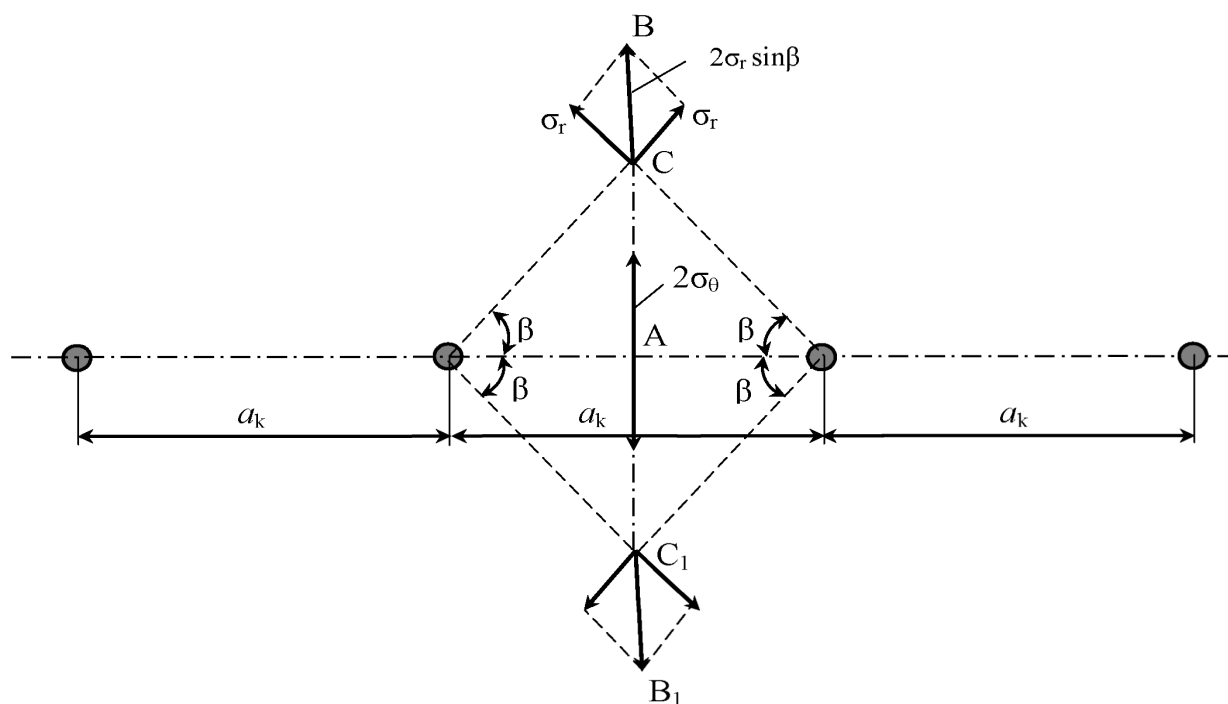


Рис. 2. Вихідна схема до розрахунку відстані між шпурами з використанням НРС [3]

на відстані від сусідніх шпурів. Ці напруги також створюють розтягуючі зусилля в площині щілини, а завжди необхідно знати витрати енергії на розсування стінок щілини після утворення магістральної тріщини, що є необхідним для строплення блоків.

Щілина виникає в масиві під дією розтягуючих напруг σ_θ в точці А і симетричних, спрямованих в різні сторони розтягуючих напруг в точках С і С₁, що формуються в результаті геометричного складання радіальних напруг стиснення в цих точках (рис. 2).

В результаті [3] запропоновано формулу визначення ефективної відстані між шпурами a_k при використанні НРС для рівного відриву гірських порід, яку ми рекомендуємо модифікувати з урахуванням викладених вище міркувань відношенням межі міцності породи паралельно шаруватості ($\sigma_{\parallel}$) і перпендикулярно ($\sigma_{\perp}$), що певною мірою компенсує можливу системну помилку в розрахунках a_k

$$a_k = 0,17d_w \left(\frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_{\perp}} \right) \left[P(t) \left(0,85 + \frac{\mu}{1-\mu} \right) / (\sigma'_p + \sigma_h) \right]^{\frac{2}{3}}, \text{ м} \quad (1)$$

де d_w – діаметр шпуру, м; $P(t)$ – стискаюча напруга, зумовлена дією НРС на стінки шпуру, МПа; μ – коефіцієнт Пуассона; σ'_p – межа

міцності породи при розтягуванні з урахуванням коефіцієнта структурного ослаблення даного масиву, МПа; σ_h – додаткові напруги, необхідні для переміщення стінок щілини на деяку величину $h_{щ}$, та її розкриття, МПа. Крім того, використовуючи встановлені [3] аналітичні залежності зміни відстані a_k між шпурами з НРС від діаметра шпуру, стискаючої напруги від дії НРС на стінки шпуру, коефіцієнта Пуассона, межі міцності породи при розтягуванні, а також додаткового напруження, необхідного для переміщення стінок блоку на деяку відстань для розкриття тріщини з метою забезпечення можливості строповки останнього, ми побудували суміщений графік даних залежностей, що дало можливість виявити смугу, в межах якої криві графіків виявляють найвищу щільність, яку ми назвали пріоритетним діапазоном, оскільки він дозволяє виключити з аналізу здебільшого малоймовірні ситуації та починати з найвірогідніших (рис. 3).

Таким чином, ми пропонуємо визначати відстань між шпурами (свердловинами) з урахуванням впливу на формування магістральної тріщини відколу анізотропії породи, оскільки в більшості гірських порід це значною мірою впливає не тільки на енергетичні показники

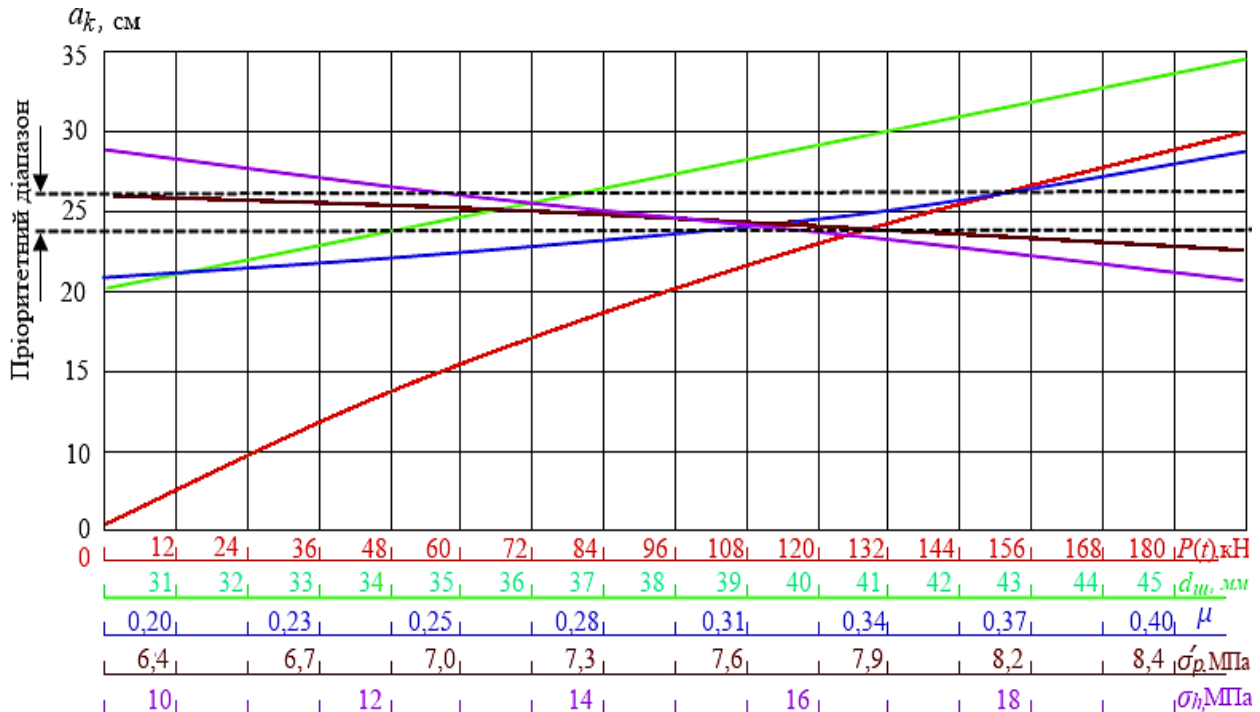


Рис. 3. Зміна відстані між шпурами залежно від d_w – діаметра шпуру, м; $P(t)$ – стискаючої напруги, зумовленої дією НРС на стінки шпуру, МПа; μ – коефіцієнту Пуассона; σ'_p – межі міцності породи при розтягуванні з урахуванням коефіцієнта структурного ослаблення масиву, МПа; σ_h – додаткові напруги, необхідні для переміщення стінок щілини на величину $h_{щ}$, та її розкриття, МПа

технології, але й на якість кінцевої продукції. Фактично пропонується уведення в розрахункові формули відношення максимальної та мінімальної векторної міцності породи, що у більшості випадків відповідає не тільки напрямкам паралельно та перпендикулярно явній або прихованій шаруватості останньої, але й домінуючій орієнтації тріщин субмеридіональних та субширотних систем, що значно спрощує проектування бурових робіт [9].

Стосовно другої субдинамічної фази навантаження породного масиву з остаточним відокремленням блоків від масиву, то варто розглянути конструкцію піроклину [10] як основного засобу-тригера створення чітко орієнтованих розпирних зусиль високої інтенсивності в субдинамічному режимі.

На даний момент нами удосконалюється піроклин (рис. 4), який вирішив проблему непроступного до того для гірничої практики діапазону між статичним та динамічним (вибуховим) режимами.

Головним недоліком даного пристрою є придатність його застосування виключно у вертикальних свердловинах внаслідок виливання горючої рідини в разі нахилу, на усунення чого й спрямоване удосконалення даної конструкції нами.

До винаходу даного пристрою практично не було шляхів узгодження протилежних за своєю суттю механізмів реалізації двох названих режимів, які, з причини існувавшего тривалий час розриву в доступних динамічних діапазонах керованого навантаження середовищ, не зовсім виправдано розглядалися як альтернативні. Розглянутий нижче варіант ілюструє один з підходів у спробах створення придатної до використання математичної моделі на шляху розвитку теоретичних основ субдинамічної механіки.

Серед теорій, що розкривають особливості крихкого руйнування природного каменю як функції часу заслуговує на особливу увагу в даному контексті енергетична теорія Журкова [1], за якою

$$t_i = t_p \exp\left(\frac{E_a - v_a \sigma}{kT}\right), \quad (2)$$

а також степенева залежність тривалості від навантаження (2):

$$t_i = t_p \left(\frac{\sigma}{\sigma_p}\right)^{-n} \exp\left[\frac{E_a}{kT}\right] \quad (3)$$

Це – усереднені значення статичної тривалості за константних значень напруг в часі. За субдинамічної ситуації ці вирази стають рівняннями швидкості росту тріщини (4), (5):

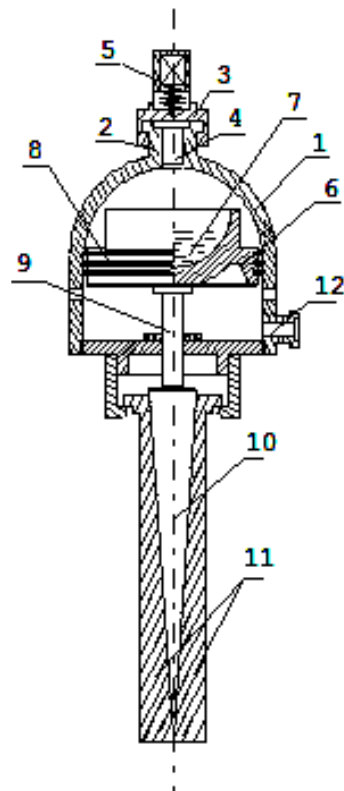


Рис. 4. Устрій піроклину: 1 – корпус; 2, 12 – горловини; 3 – затвор; 4 – піропатрон; 5 – ініціатор; 6 – поршень; 7 – горюча рідина; 8 – компресійні кільця; 9 – силовий шток; 10 – розпирний клин; 11 – розсувні щоки

$$v_c = v_e \exp\left(-\frac{E_a - bK_1}{kT}\right); \quad (4)$$

$$v_c = v_e \left(\frac{K_1}{K_s}\right)^n \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right); \quad (5)$$

де K_1 – коефіцієнт інтенсивності напружень в межах закону Гука.

В лінійній теорії пружності ці співвідношення задовільно апроксимуються до стадії прискореного росту тріщини. А так як за квазістатичного руйнування полімінеральні кристалічні породи є неоднорідним середовищем, для нього процес руйнування макроскопічних твердих тіл відбувається за статистичним розподілом Вейбулла.

$$P(\sigma) = 1 - \exp\left[-(\sigma/\sigma_0)^n\right] \quad (6)$$

В теорії феноменологічних моделей руйнування розростання тріщин розглядається, як стрибкоподібний випадковий процес, а задача росту тріщин:

$$\frac{\partial V(L, t/L_0)}{\partial t} = -Z(L, \sigma)V + \int_0^{L-L_0} \omega(l)Z(L-l, \sigma)V(L-l, t/L_0)dl, \\ V(L, t/L_0) = \sigma + (L-L_0), \quad (7)$$

де $V(l, t/L_0)$ – щільність розподілу початкових розмірів тріщин L_0 ; $Z(L, \sigma)$ – середній час очікування елементарного акту росту тріщини; $\omega(l)$ – щільність розподілу довжини стрибків. Фізична суть цієї математичної моделі полягає в тому, що елементарний акт росту тріщини є складним багатоступеневим процесом, для опису якого на різних етапах необхідно залучати енергетичну модель (2), (3), модель розподілу Вейбулла (6) та безструктурну модель (7).

Застосовуючи дані функції до залежностей (4) і (5), одержано значення середніх швидкостей росту тріщин при субдинамічному руйнуванні порід:

$$Z(L, \sigma) = Z_0 \left(\frac{bK_1}{kT} \right)^m \exp \left(-\frac{E_a - bK_1}{kT} \right) \quad (8)$$

$$Z(L, \sigma) = Z_0 \left(\frac{K_1}{K_s} \right)^m \exp \left(-\frac{E_a}{kT} \right) \quad (9)$$

Для аргументу функції розподілу Вейбулла сумарної площі елементарних контактів, які мають певні незалежні значення межі міцності на розтяг σ , є функція щільності розподілу $f(\sigma)$, а сумарна площа зразка подається у вигляді інтегралу від розподілу щільності в діапазоні від 0 до $\sigma_{\max}$ (10):

$$S = \int_0^{\sigma_{\max}} f(\sigma) d\sigma \quad (10)$$

За умови постійного навантаження породи в процесі мікроруйнування бере участь тільки частина міжмінеральних зв'язків, міцність яких дорівнює, або є меншою, ніж напруження, зумовлене зовнішнім впливом. Виходячи з цього, більшому зовнішньому навантаженню відповідає більша кількість елементарних міжмінеральних зв'язків, що залучаються до

процесу руйнування, що узгоджується з явищем динамічної міцності – короткотривалої здатності витримувати більші навантаження, ніж за статичних випробувань.

Таким чином, дія статичного навантаження протягом більш тривалого часу зумовлює мікроруйнування і зменшення площі контакту (накопичення пошкоджень). Умова рівноважного стану забезпечується у випадку рівності сил, що діють на породу ззовні, та сил протидії мінеральних зв'язків: $F_{ext} \geq F_{int}$.

Даний вираз через інтеграл щільності розподілу Вейбулла (11):

$$\sigma \int_0^{\sigma_{\max}} f(\sigma) d\sigma \geq (\sigma + d\sigma) \left(\int_0^{\sigma_{\max}} f(\sigma) d\sigma - \int_0^{\sigma} f(\sigma) d\sigma \right) \quad (11)$$

За певного значення σ виникає стан критичної рівноваги, а його перевищення зумовлює некероване остаточне руйнування каменю (12):

$$\sigma_{lim} = (\sigma + d\sigma) \quad (12)$$

Висновки. Оскільки загальний процес спрямованого руйнування кристалічних порід складається з ряду складних процесів мікро- та макроруйнування, які протікають паралельно, але, разом з тим, є взаємозалежними, а також з найбільш значимого в даному контексті процесу росту магістральних тріщин, і що ці процеси протікають за різними законами в звичайній та субдинамічній постановці задачі руйнування, їх доцільно описувати аналітично з комплексно-системним використанням енергетичної теорії руйнування, статистичного розподілу та теорії безструктурних моделей. Разом з тим означений підхід щодо аналітичного опису процесу субдинамічного руйнування порід вимагає в подальшому встановлення невідомих поки що допустимих границь застосування кожної окремої аналітичної залежності, відповідно до етапів і динаміки навантаження та напруження середовища, аж до повного його руйнування для забезпечення адекватності такого моделювання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шашенко О. М., Пустовойтенко В. П. Механіка гірських порід : підручник. Київ : Новий друк, 2004. 400 с.
2. Rios J. V. Practical application of expanding cements for crushing and dredging rocks. *Rocas y minerales*. 1983. Vol. 12, No. 143. P. 20–21, 24–26.
3. Заїров Ш. Ш., Равшанова М. Х., Тагаєв І. А., Худойбердієв О. Ж. Статичний метод руйнування гірських порід з використанням невибухової руйнівної суміші. *Геотехнічна механіка*. 2021. № 156. С. 24–35. DOI: 10.15407/geotm2021.156.024.
4. Пат. 59940 Україна, МПК C04B 7/00. Невибухова руйнівна речовина НРР-80 / Грибко В. Ф., Щебликін С. В., Палей А. В. ; заявник Грибко В. Ф. № 2002129862 ; заявл. 09.12.2002 ; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7. 6 с.
5. Eckler H. O., Bergholt W., Peneyal M., Korth D. Method of fracture of brittle materials : Pat. 246982 German Democratic Republic. 1987.

6. Crushing agent : Pat. 57-187044 Japan, B02C 19/18 / Aitou A., Nakatani S., Miwa A. ; priority 12.05.1981 ; publ. 17.11.1982.
7. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*. 1921. Vol. 221. P. 163–197. DOI: 10.1098/rsta.1921.0006.
8. Irwin G. Fracture dynamics. *Encyclopedia of Physics*. Vol. IV / ed. S. Flügge. Berlin : Springer, 1958. P. 551–590.
9. Скачков А. О. Просторова спрямованість енергії комбінованих свердловинних зарядів за диференційованого енергонасичення масиву порід. *Розробка родовищ корисних копалин : збірник наукових праць / Національний гірничий університет*. 2018. № 55. С. 88–96.
10. Пат. 98063084 Україна. Спосіб створення регульованих зусиль для розколу гірських порід та пристрій для його здійснення / Жуков С. О. ; опубл. 16.04.2001.
11. Гнеденко Б. В. Курс теорії ймовірностей. Київ : ВПЦ Київський університет, 2010. 464 с.
12. Cho S. H., Kaneko K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. P. 771–784. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.03.134.

REFERENCES:

1. Shashenko, O. M., & Pustovoitenko, V. P. (2004). *Mekhanika hirskeykh porid [Rock mechanics]: pidruchnyk*. Kyiv: Novyi druk. [in Ukrainian]
2. Rios, J. V. (1983). Practical application of expanding cements for crushing and dredging rocks. *Rocas y minerales*, 12(143), 20–21, 24–26.
3. Zairov, Sh. Sh., Ravshanova, M. Kh., Tahaiev, I. A., & Khudoiberdiiev, O. Zh. (2021). Statychnyi metod ruinuвання hirskeykh porid z vykorystanniam nevybukhovoi ruivnoi sumishi [Static method of rock fragmentation using a non-explosive expansion compound]. *Heotekhnichna mekhanika – Geotechnical Mechanics*, (156), 24–35. <https://doi.org/10.15407/geotm2021.156.024> [in Ukrainian]
4. Hrybko, V. F., Shcheblykin, S. V., & Palei, A. V. (2005). *Nevybukhova ruivna rechovyna NRR-80 [Non-explosive expansion substance NRR-80]*. Ukraine Patent No. 59940. [in Ukrainian]
5. Eckler, H. O., Bergholt, W., Peneyal, M., & Korth, D. (1987). *Method of fracture of brittle materials*. German Democratic Republic Patent No. 246982.
6. Aitou, A., Nakatani, S., & Miwa, A. (1982). *Crushing agent*. Japan Patent No. 57-187044.
7. Griffith, A. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 221, 163–197. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
8. Irwin, G. (1958). Fracture dynamics. In S. Flügge (Ed.), *Encyclopedia of Physics* (Vol. IV, pp. 551–590). Berlin: Springer.
9. Skachkov, A. O. (2018). Prostorova spriamovanist enerhii kombinovanykh sverdlvynnykh zariadiv za dyferentsiiovanoho enerhonasychnnia masivu porid [Spatial orientation of the energy of combined borehole charges under differentiated energy saturation of the rock mass]. *Rozrobka rodovysch korysnykh kopalyn – Mining of Mineral Deposits*, (55), 88–96. [in Ukrainian]
10. Zhukov, S. O. (2001). *Sposib stvorennia rehuliovanykh zusyl dlia rozkolu hirskeykh porid ta prystrii dlia yoho zdiisnennia [Method for creating adjustable forces for rock splitting and a device for its implementation]*. Ukraine Patent No. 98063084. [in Ukrainian]
11. Hniedenko, B. V. (2010). *Kurs teorii imovirnostei [A course in probability theory]*. Kyiv: VPC Kyivskiy universytet. [in Ukrainian]
12. Cho, S. H., & Kaneko, K. (2004). Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 771–784. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.134>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 09.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 614.8:355.58

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-31>

СИНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ МІННОГО РИЗИКУ В СИСТЕМІ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

Куртов Анатолій Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри підготовки офіцерів запасу
Військово-юридичного інституту
Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого
ORCID ID: 0009-0008-4972-5455

Дубовик Семен Олександрович,

викладач кафедри загальновійськових дисциплін
Військово-юридичного інституту
Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого
ORCID ID: 0009-0005-1506-2815

Куртов Дмитро Анатолійович,

старший викладач кафедри загальновійськових дисциплін
Військово-юридичного інституту
Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого
ORCID ID: 0009-0007-8401-9954

У статті досліджено проблему оцінювання мінного ризику у системі цивільного захисту в умовах масштабного мінного забруднення територій України. Обґрунтовано, що існуючі підходи до оцінювання мінної небезпеки переважно мають лінійний і фрагментарний характер, що не дозволяє повною мірою враховувати взаємодію технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників. Проаналізовано сучасний стан протимінної діяльності, а також наукові підходи до оцінювання ризику в гуманітарному розмінуванні та управлінні складними системами. Встановлено, що мінний ризик доцільно розглядати як інтегральну характеристику, яка формується внаслідок взаємодії множини факторів.

Методологічною основою дослідження є системний та ризик-орієнтований підходи, а також методи аналізу, узагальнення, експертного оцінювання та елементи математичного моделювання.

На основі зазначених підходів розроблено синергетичну модель інтегральної оцінки мінного ризику, яка враховує нелінійний ефект взаємодії факторів і дозволяє формалізувати рівень небезпеки на певній території. Наукова новизна дослідження полягає у розробці інтегрального показника мінного ризику, що враховує синергетичний ефект взаємодії технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників. Запропоновано факторну структуру мінного ризику, що включає технічні, територіальні, соціальні та управлінські складові.

Здійснено сценарне моделювання для трьох типових умов: урбанізованих територій, сільськогосподарських угідь та лісових масивів. Сценарне моделювання показало, що інтегральний рівень мінного ризику визначається не лише окремими значеннями факторів, але й характером їх поєднання та взаємодії.

Показано, що запропонована модель може використовуватися для ранжування територій за рівнем ризику, пріоритетизації заходів розмінування, оптимізації розподілу ресурсів та підтримки прийняття управлінських рішень у системі цивільного захисту.

Ключові слова: мінний ризик, мінна небезпека, протимінна діяльність, цивільний захист, гуманітарне розмінування, ризик-орієнтований підхід, синергетична модель, інтегральна оцінка ризику.

Kurtov Anatolii, Dubovyk Semen, Kurtov Dmytro. Synergetic model for integral assessment of mine risk in the civil protection system

The article examines the problem of mine risk assessment within the civil protection system under conditions of large-scale contamination of the territory of Ukraine with explosive hazards. It is substantiated that existing approaches to mine hazard assessment are predominantly linear and fragmented, which limits their ability to fully account for the interaction of technical, territorial, social, and managerial factors. The current state of mine action

activities is analyzed, along with contemporary approaches to risk assessment in humanitarian demining and complex systems management. It is established that mine risk should be considered as an integral characteristic formed through the interaction of multiple factors.

The methodological basis of the study includes systemic and risk-based approaches, as well as methods of analysis, generalization, expert assessment, and elements of mathematical modeling.

Based on these approaches, a synergistic model for the integral assessment of mine risk is developed. The model accounts for the nonlinear effects of factor interaction and enables the formalization of hazard levels within a specific territory. The scientific novelty of the study lies in the development of an integral mine risk indicator that incorporates the synergistic interaction of technical, territorial, social, and managerial factors. A factor structure of mine risk is proposed, including technical, territorial, social, and managerial components.

Scenario-based modeling is conducted for three typical environments: urban areas, agricultural lands, and forest zones. The results of model validation demonstrate that the integral level of mine risk is determined not only by individual factor values but also by their combination and interaction.

It is shown that the proposed model can be applied for risk-based territorial ranking, prioritization of demining activities, optimization of resource allocation, and support of decision-making within the civil protection system.

Key words: mine risk, mine hazard, mine action, civil protection, humanitarian demining, risk-based approach, synergistic model, integral risk assessment.

Вступ. Сучасні умови повномасштабної збройної агресії проти України зумовили формування нових комплексних викликів у сфері національної безпеки, серед яких особливе місце займає проблема мінної небезпеки. Масове застосування мін, нерозірваних боєприпасів та саморобних вибухових пристроїв призвело до значного забруднення територій вибухонебезпечними предметами, що створює довготривалу загрозу для життя і здоров'я населення, функціонування об'єктів критичної інфраструктури та відновлення економічної діяльності. За наявними оцінками, значна частина території України залишається потенційно небезпечною, що обумовлює необхідність формування ефективної системи управління мінною небезпекою як складової цивільного захисту.

Водночас мінна небезпека в Україні має не лише локальний, але й трансграничний характер, оскільки наслідки мінного забруднення можуть поширюватися на суміжні території, впливаючи на безпеку населення та функціонування прикордонних регіонів. Крім того, мінна загроза має довгостроковий характер, зберігаючись протягом десятиліть після завершення активних бойових дій. У цьому контексті розробка ефективних підходів до оцінювання та прогнозування мінного ризику набуває значення не лише для забезпечення поточної безпеки, але й для стратегічного відновлення територій, включаючи відновлення економічної діяльності, землекористування та інфраструктури.

У системі цивільного захисту мінна небезпека виступає як складна багатофакторна загроза, яка формується під впливом технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників. Вона має не лише інженерно-технічний, але й соціально-економічний та організаційний вимір, що зумовлює необхідність застосування системного підходу до її оцінювання

та мінімізації. Водночас існуюча практика протимінної діяльності в Україні переважно орієнтована на реагування на вже виявлені загрози, тоді як питання прогнозування рівня мінного ризику та пріоритезації заходів розмінування залишаються недостатньо формалізованими.

Аналіз сучасних підходів до оцінювання мінної небезпеки свідчить, що традиційні методи, які базуються на лінійних показниках (зокрема, щільності мінування або кількості виявлених вибухонебезпечних предметів), не дозволяють повною мірою врахувати складність і динамічність мінного середовища. Зокрема, вони не відображають ефекту взаємопідсилення факторів ризику, коли поєднання декількох несприятливих умов призводить до нелінійного зростання рівня загрози.

Отже, існуючі підходи до оцінювання мінної небезпеки потребують удосконалення шляхом переходу від лінійних до нелінійних моделей, що враховують синергетичний ефект взаємодії факторів.

У зв'язку з цим науковою проблемою дослідження є відсутність формалізованої моделі інтегральної оцінки мінного ризику у системі цивільного захисту.

Метою статті є розробка та обґрунтування синергетичної моделі інтегральної оцінки мінного ризику в системі цивільного захисту України, яка дозволяє формалізувати вплив ключових факторів мінної небезпеки та забезпечити підвищення ефективності планування заходів протимінної діяльності.

Для досягнення поставленої мети у статті передбачається вирішення таких завдань:

- проаналізувати сучасний стан протимінної діяльності у системі цивільного захисту України;
- дослідити теоретичні засади ризик-орієнтованого підходу до оцінювання мінної небезпеки;

- визначити основні фактори формування мінного ризику;
- розробити синергетичну модель інтегральної оцінки мінного ризику;
- обґрунтувати можливості практичного застосування запропонованої моделі у системі цивільного захисту.

У дослідженні використано системний підхід, метод аналізу та узагальнення, елементи математичного моделювання, а також експертні методи оцінювання факторів ризику.

Запропонований підхід дозволяє перейти від описового до формалізованого оцінювання мінної небезпеки, що створює методичну основу для підвищення ефективності управління ризиками у сфері цивільного захисту.

Система протимінної діяльності в Україні формується в умовах значного зростання масштабів мінного забруднення територій, що обумовлює підвищені вимоги до ефективності функціонування суб'єктів цивільного захисту. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що Україна належить до держав із найвищим рівнем мінної небезпеки у світі, що потребує впровадження комплексних підходів до управління ризиками [1, с. 5-7; 2, с. 10–12].

Ключову роль у системі протимінної діяльності відіграють підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій, які здійснюють обстеження територій, знешкодження вибухонебезпечних предметів, а також заходи з інформування населення про мінну небезпеку [3, IMAS 12.10]. Водночас дослідження показують, що діяльність ДСНС значною мірою орієнтована на реагування на вже виявлені загрози, що обмежує можливості превентивного управління ризиками [4, с. 22–25].

Разом із тим така орієнтація на реагування значною мірою зумовлена об'єктивними факторами, передусім безпрецедентними масштабами мінного забруднення територій. Значні площі потенційно небезпечних земель, обмеженість ресурсів та необхідність оперативного реагування на безпосередні загрози змушують підрозділи протимінної діяльності функціонувати у режимі так званого «гасіння пожежі», коли пріоритет надається ліквідації вже виявлених небезпечних об'єктів. У таких умовах системне прогнозування ризиків та довгострокове планування відходять на другий план, що знижує загальну ефективність управління мінною небезпекою.

Важливим елементом системи протимінної діяльності є оператори ПМД, включаючи як національні, так і міжнародні організації, діяльність яких координується відповідно до

вимог міжнародних стандартів. Як зазначається у дослідженнях United Nations Mine Action Service, ефективність протимінної діяльності значною мірою залежить від узгодженості дій різних суб'єктів та якості інформаційного обміну [2, с. 18-21; 3, IMAS 07.11].

Суттєву роль у розвитку системи протимінної діяльності відіграє міжнародна технічна та фінансова допомога, зокрема з боку Geneva International Centre for Humanitarian Demining та United Nations Development Programme. У сучасних звітах зазначається, що міжнародна підтримка сприяє впровадженню сучасних методів обстеження територій, цифрових систем управління даними (зокрема IMSMA), а також підвищенню кваліфікації персоналу [5, с. 30-34; 6, с. 12-16].

Разом із тим аналіз сучасного стану протимінної діяльності свідчить про наявність системних проблем, пов'язаних із недостатнім рівнем інтеграції даних, обмеженими можливостями прогнозування ризиків та фрагментарністю інформаційного забезпечення [4, с. 26-29; 6, с. 20-23]. Наявні підходи до оцінювання мінної небезпеки здебільшого базуються на результатах обстеження територій та статистичних даних, що відображають вже існуючі загрози.

При цьому недостатньо розвиненими залишаються інструменти прогнозного аналізу, які дозволяють оцінювати потенційний рівень небезпеки з урахуванням взаємодії різних факторів. У міжнародних дослідженнях наголошується на необхідності переходу від реактивних моделей управління до проактивних, що базуються на ризик-орієнтованому підході та використанні аналітичних моделей [1, с. 8-10; 5, с. 40-44].

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває питання пріоритезації заходів протимінної діяльності (prioritization), що передбачає спрямування ресурсів на ті території, де рівень ризику є найвищим, а не лише там, де зафіксовано найбільшу кількість вибухонебезпечних предметів [3, IMAS 07.11].

Таким чином, сучасна система протимінної діяльності у межах цивільного захисту переважно орієнтована на реагування на вже існуючі загрози, що обумовлено масштабами мінного забруднення, але водночас обмежує можливості прогнозування та попередження мінних ризиків. Це зумовлює необхідність впровадження інтегральних моделей оцінювання мінної небезпеки, які забезпечують науково обґрунтовану пріоритезацію заходів та підвищують ефективність управління ризиками.

Проблематика оцінювання мінного ризику у сфері протимінної діяльності посідає важливе

місце у сучасних міжнародних дослідженнях, оскільки ефективність гуманітарного розмінування дедалі більше залежить не лише від технічних спроможностей, а й від якості аналітичного забезпечення прийняття рішень. У цьому контексті особливого поширення набув ризик-орієнтований підхід до нетехнічного та технічного обстеження територій [1, с. 57; 2, с. 10-12], відповідно до якого пріоритетність заходів визначається не тільки фактом наявності вибухонебезпечних предметів, але й потенційними наслідками для населення, інфраструктури, землекористування та економічної діяльності [7, с. 1-3].

У міжнародній науковій та прикладній практиці ризик-орієнтований підхід розглядається як альтернатива суто технічному баченню мінної небезпеки. Якщо традиційна логіка гуманітарного розмінування зосереджувалася переважно на пошуку та знешкодженні вибухонебезпечних предметів, то сучасні підходи акцентують увагу на необхідності оцінювання ступеня загрози для конкретних категорій населення, об'єктів та територій. Саме тому у сучасних дослідженнях дедалі частіше застосовуються багатокритеріальні моделі, які дозволяють інтегрувати технічні, просторові, соціальні та організаційні характеристики в єдину аналітичну систему [8, с. 2-5].

Значний внесок у розвиток методології оцінювання мінного ризику зробили міжнародні організації, насамперед UNMAS і GICHD. У документах та аналітичних розробках цих інституцій мінна небезпека розглядається не лише як результат фізичної присутності мін чи інших вибухонебезпечних предметів, а як складне явище, що формується на перетині технічних характеристик загрози, особливостей території, інтенсивності використання земель та поведінкових особливостей населення [3; 9, с. 10-15]. Такий підхід є важливим, оскільки дозволяє перейти від формальної фіксації небезпечних ділянок до їх функціональної оцінки з точки зору реального ризику.

У межах гуманітарного розмінування особлива увага приділяється просторовому аналізу ризиків. У сучасних матеріалах GICHD підкреслюється, що інтеграція геопросторових даних, інформації про щільність населення, характер землекористування, наявність транспортної та соціальної інфраструктури дає змогу значно точніше визначати пріоритети розмінування [9, с. 22-27]. Це означає, що сам факт мінного забруднення ще не є достатнім показником для визначення черговості заходів: одна й та сама щільність забруднення може створювати різний

рівень ризику залежно від того, чи йдеться про сільськогосподарські угіддя, лісові масиви, деокуповані села або урбанізовані території.

Методологічну основу цих підходів значною мірою становлять Міжнародні стандарти протимінної діяльності (IMAS), які регламентують проведення нетехнічного та технічного обстеження, управління інформацією, оцінювання ризиків і контроль якості [3, IMAS 07.11]. Хоча IMAS не пропонують єдиної універсальної математичної моделі оцінки мінного ризику, вони формують важливе концептуальне підґрунтя для системного підходу, відповідно до якого оцінювання небезпеки має спиратися на комплекс факторів і бути пов'язаним із практичними рішеннями щодо планування та пріоритезації робіт.

Разом із тим аналіз наукових публікацій свідчить, що у більшості досліджень, присвячених оцінюванню ризиків у складних системах, переважають лінійні або квазі-лінійні підходи [8, с. 6-8; 10, с. 2192-2194]. Їх сутність полягає в тому, що ризик визначається як сума або зважена сума окремих факторів, які розглядаються як незалежні змінні. Перевагою такого підходу є його простота, прозорість і можливість швидкого практичного застосування. Однак саме ця спрощеність одночасно є і його основним недоліком, оскільки у реальних умовах фактори мінної небезпеки не діють ізольовано.

Для протимінної діяльності це має принципове значення. Наприклад, висока технічна складність вибухонебезпечних предметів сама по собі ще не визначає критичний рівень загрози, однак у поєднанні зі складним рельєфом, низьким рівнем обізнаності населення та недостатньою координацією між суб'єктами ПМД рівень ризику може зростати непропорційно. Саме такий ефект взаємопідсилення ігнорується у більшості моделей, де фактори підсумовуються лінійно.

Ще однією проблемою сучасних досліджень є їх фрагментарність. Частина робіт зосереджується переважно на технічних аспектах – типах вибухонебезпечних предметів, методах виявлення, технологіях розмінування. Інші дослідження приділяють основну увагу геоінформаційному аналізу, картографуванню небезпечних територій або питанням інформування населення [9, с. 30-35; 11]. Однак інтеграція технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників у єдину модель оцінювання мінного ризику залишається недостатньо опрацьованою.

Окремо слід відзначити дослідження з теорії управління ризиками, у яких доведено, що в складних соціотехнічних системах ризик

має нелінійний характер і може зростати не пропорційно, а стрибкоподібно внаслідок взаємодії кількох несприятливих чинників [10, с. 2195-2198]. Для сфери протимінної діяльності цей висновок є особливо важливим, оскільки тут небезпека визначається не лише наявністю фізичної загрози, але й контекстом її сприйняття, доступністю території, інтенсивністю її використання та спроможністю суб'єктів цивільного захисту забезпечити швидке і якісне реагування.

З урахуванням наведеного, проведений аналіз дає підстави стверджувати, що існуючі підходи до оцінювання мінної небезпеки, попри їх практичну цінність, мають три суттєві обмеження. По-перше, вони носять переважно лінійний характер. По-друге, значна частина з них є фрагментарною та зосереджується на окремих групах факторів. По-третє, у них майже не враховується синергетичний ефект взаємодії факторів ризику.

Отже, існуючі підходи до оцінювання мінної небезпеки не забезпечують достатньої аналітичної основи для комплексного прогнозування мінного ризику у системі цивільного захисту.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки інтегральної моделі, яка б дозволяла поєднати технічні, територіальні, соціальні та управлінські чинники в єдину систему оцінювання та врахувати нелінійний характер їх взаємодії. Саме таке завдання і зумовлює доцільність застосування синергетичного підходу у межах даного дослідження.

Методи та методики дослідження. Методологічною основою дослідження є системний та ризик-орієнтований підходи, які дозволяють розглядати мінну небезпеку як складну багатофакторну систему. Використання зазначених підходів зумовлене необхідністю врахування взаємодії різномірних чинників, що формують рівень мінного ризику у системі цивільного захисту.

У сучасній науковій практиці ризик визначається як поєднання ймовірності настання небезпечної події та тяжкості її наслідків або ширше – як вплив невизначеності на досягнення цілей [7; 12, с. 173-175]. Такий підхід дозволяє розглядати ризик не лише як характеристику небезпеки, але і як інструмент прийняття управлінських рішень у складних системах.

У сфері цивільного захисту ризик пов'язаний із виникненням надзвичайних ситуацій, що можуть призводити до людських втрат, матеріальних збитків та порушення функціонування інфраструктури. У контексті протимінної діяльності ризик визначається як ймовірність

ураження населення або об'єктів вибухонебезпечними предметами та масштаб можливих наслідків [13, с. 25-30].

З огляду на специфіку протимінної діяльності важливим є нормативно-правове забезпечення формування та оцінювання ризиків. Відповідно до Закону України «Про протимінну діяльність в Україні» [14], ключовим елементом є проведення нетехнічного та технічного обстеження територій [3; IMAS 08.10; IMAS 08.20], результати яких становлять інформаційну основу для оцінювання мінної небезпеки.

Таким чином, дані нетехнічного обстеження, що включають відомості про типи загроз, особливості території, характер використання земель та поведінкові аспекти населення, можуть розглядатися як вихідні параметри для формалізованого оцінювання мінного ризику в межах запропонованої моделі (Т, L, S, M).

Сучасні підходи до управління у сфері цивільного захисту базуються на принципах ризик-орієнтованого управління, відповідно до яких ключовим завданням є не лише реагування на надзвичайні ситуації, але й їх попередження [15, с. 50-55; 16]. Управління ризиками включає ідентифікацію небезпек, аналіз та оцінювання ризиків, а також розробку заходів щодо їх мінімізації.

Системний підхід передбачає розгляд мінної небезпеки як сукупності взаємопов'язаних факторів, взаємодія яких визначає рівень ризику. У складних соціотехнічних системах ризик має нелінійний характер і може зростати непропорційно внаслідок одночасного впливу кількох несприятливих чинників [10, с. 2195-2198; 17, с. 107-109].

У межах дослідження використано методи аналізу та узагальнення, елементи математичного моделювання, а також експертні методи оцінювання факторів ризику. З урахуванням зазначених підходів сформовано факторну структуру мінного ризику, що включає технічні, територіальні, соціальні та управлінські чинники.

Отже, запропонований методичний підхід дозволяє перейти від описового до формалізованого оцінювання мінної небезпеки, що створює основу для побудови інтегральної моделі мінного ризику.

Як видно з табл. 1, мінний ризик формується під впливом взаємопов'язаних груп факторів, що охоплюють технічні, територіальні, соціальні та управлінські аспекти.

Ці фактори формують базовий рівень небезпеки, однак не визначають його повною мірою без урахування інших умов.

Таблиця 1

Система факторів мінного ризику у цивільному захисті

Група факторів	Позначення	Зміст фактору	Основні показники
Технічні	T	Характеристики вибухонебезпечних предметів	типи мін, наявність мін-пасток, стан боєприпасів, складність знешкодження
Територіальні	L	Природно-ландшафтні умови	тип ґрунту, рельєф, рослинність, доступність території
Соціальні	S	Поведінка та активність населення	рівень обізнаності, щільність населення, інтенсивність використання території
Управлінські	M	Організація протимінної діяльності	координація, ресурси, інформаційний обмін, планування робіт

Примітка: складено автором на основі систематизації факторів мінної небезпеки.

Територіальні фактори відображають природні умови, в яких реалізується мінна небезпека. До них належать рельєф місцевості, тип ґрунту, густота рослинності, рівень заболоченості та доступність території.

Вони впливають як на ймовірність виявлення вибухонебезпечних предметів, так і на ефективність проведення робіт із розмінування.

Соціальні фактори пов'язані з діяльністю населення та особливостями використання територій. Вони включають рівень обізнаності про мінну небезпеку, щільність населення, інтенсивність використання земель та дотримання правил безпеки.

У багатьох випадках саме ці фактори визначають фактичний рівень ризику, оскільки вони впливають на ймовірність контакту людей із небезпечними об'єктами.

Управлінські фактори характеризують ефективність функціонування системи протимінної діяльності. До них належать рівень координації між суб'єктами, забезпеченість ресурсами, якість планування, швидкість обміну інформацією, використання інформаційних систем, а також рівень міжнародної сумісності даних (interoperability) [3; 15].

Актуальність останнього аспекту зумовлена тим, що у протимінній діяльності в Україні беруть участь як національні, так і міжнародні оператори, діяльність яких потребує узгодженого інформаційного обміну. Недостатній рівень сумісності даних, різні формати їх обробки та обмежена інтеграція інформаційних систем можуть ускладнювати координацію дій, що негативно впливає на ефективність управління ризиками.

Недостатній рівень організації та координації, включаючи проблеми сумісності даних, може значно підвищувати ризик навіть за відносно сприятливих технічних і територіальних умов.

Ключовою особливістю запропонованої факторної структури є те, що зазначені фактори не є незалежними, а формують взаємопов'язану

систему. Їх взаємодія може призводити до синергетичного ефекту, за якого одночасна дія кількох несприятливих чинників викликає непропорційне зростання рівня ризику [17, с. 107-109; 18, с. 460-463].

Зокрема, поєднання складного рельєфу місцевості, високої технічної складності вибухонебезпечних предметів та низького рівня обізнаності населення створює значно вищий рівень небезпеки, ніж кожен із цих факторів окремо.

Отже, мінний ризик доцільно розглядати як результат взаємодії технічних, територіальних, соціальних та управлінських факторів, що формує підґрунтя для побудови інтегральної моделі його оцінювання.

Водночас врахування лише сукупності факторів без урахування характеру їх взаємодії не дозволяє адекватно відобразити реальний рівень мінної небезпеки. У складних соціотехнічних системах взаємодія факторів має нелінійний характер, що зумовлює виникнення синергетичного ефекту, за якого загальний рівень ризику зростає непропорційно.

З огляду на це виникає необхідність побудови такої математичної моделі, яка б:

- поєднувала різномірні фактори в єдиному інтегральному показнику;
- забезпечувала їх порівнянність та агрегування;
- враховувала нелінійний характер зростання ризику.

Результати. У межах даного дослідження для вирішення зазначеного завдання використано підхід багатокритеріального агрегування із застосуванням середньоквадратичної форми узагальнення показників та введенням коефіцієнта синергетичного підсилення.

На цій основі запропоновано інтегральну модель оцінки мінного ризику:

$$R_m = \sqrt{(w_T \cdot T)^2 + (w_L \cdot L)^2 + (w_S \cdot S)^2 + (w_M \cdot M)^2} \cdot \sigma_{syn} \quad (1)$$

де:

R_m – інтегральний показник мінного ризику;

T, L, S, M – відповідно технічний, територіальний, соціальний та управлінський чинники;
 w_T, w_L, w_S, w_M – вагові коефіцієнти;
 σ_{syn} – коефіцієнт синергетичного підсилення.

Використання середньоквадратичної форми агрегування забезпечує врахування внеску кожного фактора без ефекту лінійної компенсації, характерного для адитивних моделей. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли низьке значення одного показника штучно зменшує інтегральний рівень ризику.

Для забезпечення коректності моделі вагові коефіцієнти нормуються за умовою:

$$w_T + w_L + w_S + w_M = 1 \quad (2)$$

Кожен із факторів оцінюється за уніфікованою шкалою (наприклад, від 0 до 5). Нормування вагових коефіцієнтів забезпечує їх порівнянність та коректність агрегування в межах інтегральної моделі.

Запропонована форма моделі забезпечує агрегування факторів з урахуванням їх відносної ваги та дозволяє уникнути лінійного ефекту компенсації, коли низьке значення одного фактора штучно знижує загальний рівень ризику.

Модель базується на чотирьох групах факторів.

Технічний фактор (Т) характеризує складність та небезпечність вибухонебезпечних предметів: типи мін, наявність мін-пасток, стан боєприпасів, можливість дистанційного підриву та складність знешкодження.

Територіально-ландшафтний фактор (L) відображає природні умови: рельєф, тип ґрунту, густоту рослинності, заболоченість та доступність території.

Соціально-поведінковий фактор (S) включає рівень обізнаності населення, щільність населення, інтенсивність використання територій та дотримання правил безпеки.

Управлінсько-організаційний фактор (M) характеризує ефективність системи протимінної діяльності та включає рівень координації, забезпеченість ресурсами, якість планування, швидкість обміну інформацією та рівень сумісності даних між суб'єктами (interoperability).

Таким чином, мінний ризик формується як результат комплексної взаємодії технічних, територіальних, соціальних та управлінських факторів.

З урахуванням взаємозв'язку зазначених факторів до моделі введено коефіцієнт синергетичного підсилення, який відображає нелінійний ефект їх взаємодії.

Коефіцієнт синергетичного підсилення визначається як:

$$\sigma_{syn} = 1 + \sum_{i < j} \sigma_{ij} \quad (3)$$

де σ_{ij} – коефіцієнти взаємодії між відповідними групами факторів, що відображають ступінь їх взаємного підсилення.

Значення σ_{syn} зростає у випадках одночасного впливу кількох несприятливих факторів, що призводить до непропорційного підвищення рівня загрози.

Значення коефіцієнтів взаємодії σ_{ij} визначаються експертним шляхом на основі аналізу практики протимінної діяльності та узагальнення результатів наукових досліджень. У межах даної моделі вони приймаються в діапазоні від 0 до 1, де 0 відповідає відсутності взаємного впливу, а 1 – максимальному рівню синергетичного підсилення.

Відповідно, інтегральний коефіцієнт σ_{syn} зазвичай перебуває в інтервалі $1 \leq \sigma_{syn} \leq 2$, що відображає ступінь нелінійного зростання ризику.

Значення коефіцієнтів взаємодії наведено у вигляді матриці синергетичних зв'язків (табл. 2), сформованої на основі експертного оцінювання.

Таблиця 2

Матриця синергетичних взаємодій факторів мінного ризику

Фактори	T	L	S	M
T	–	0,30	0,25	0,35
L	0,30	–	0,20	0,25
S	0,25	0,20	–	0,40
M	0,35	0,25	0,40	–

Примітка: значення (0–1) відображають ступінь взаємного підсилення факторів.

Практичне застосування моделі передбачає використання експертних методів на основі:

- даних нетехнічного та технічного обстеження територій;
- статистичних матеріалів;
- інформації операторів протимінної діяльності.

Вагові коефіцієнти визначаються залежно від типу території. Зокрема, для урбанізованих територій більшу вагу мають технічні та соціальні фактори, тоді як для сільськогосподарських – територіальні та управлінські.

Запропонована модель може використовуватися як інструмент підтримки прийняття управлінських рішень у системі цивільного захисту, забезпечуючи ранжування територій за рівнем ризику, пріоритезацію заходів розмінування та оптимізацію розподілу ресурсів.

Отже, синергетична модель створює основу для переходу від реактивного до проактивного управління мінною небезпекою.

Для перевірки прикладної цінності запропонованої синергетичної моделі інтегральної оцінки мінного ризику доцільно здійснити її сценарне застосування до типових умов, у яких реалізується мінна небезпека в Україні. Такий підхід дозволяє продемонструвати вплив різних факторів на рівень ризику та обґрунтувати можливість використання моделі для пріоритезації заходів протимінної діяльності.

З огляду на специфіку мінного забруднення територій України, для апробації моделі виокремлено три типові сценарії: урбанізовані території, сільськогосподарські угіддя та лісові масиви. Кожен із зазначених сценаріїв характеризується специфічним поєднанням технічних, територіальних, соціальних та управлінських факторів.

Оцінювання факторів здійснюється за уніфікованою шкалою від 0 до 5, де 0 відповідає мінімальному рівню впливу, а 5 – максимальному. Значення факторів і вагових коефіцієнтів мають умовно-експертний характер і використовуються для демонстрації функціональних можливостей моделі.

Для урбанізованих територій характерним є високий рівень технічної складності мінної небезпеки, що обумовлено наявністю вибухонебезпечних предметів у забудові, інженерній інфраструктурі та транспортних мережах. Водночас значний вплив має соціальний фактор, оскільки навіть часткове повернення населення до небезпечних зон підвищує ймовірність ураження.

Для сільськогосподарських угідь визначальним є соціально-економічний вимір ризику, пов'язаний з інтенсивним використанням земель, необхідністю їх швидкого повернення до господарського обігу та забезпеченням продовольчої безпеки. При цьому технічна складність може бути нижчою, однак загальний рівень ризику залишається значним.

Лісові масиви характеризуються підвищеним впливом територіально-ландшафтних факторів, зокрема складним рельєфом, густою рослинністю та обмеженою доступністю територій, що ускладнює виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів.

На основі запропонованої моделі здійснено розрахунок інтегрального показника мінного ризику для кожного сценарію.

Для урбанізованої території:

$$R_m = \sqrt{\left[\left[(0,30 \cdot 5)^2 + (0,20 \cdot 3)^2 + (0,25 \cdot 4)^2 + (0,25 \cdot 4)^2 \right] \right]} \cdot 1,75 = 3,76$$

Для сільськогосподарських угідь:

$$R_m = \sqrt{\left[\left[(0,20 \cdot 3)^2 + (0,20 \cdot 2)^2 + (0,35 \cdot 5)^2 + (0,25 \cdot 3)^2 \right] \right]} \cdot 1,55 = 3,16$$

Для лісового масиву:

$$R_m = \sqrt{\left[\left[(0,25 \cdot 4)^2 + (0,35 \cdot 5)^2 + (0,15 \cdot 2)^2 + (0,25 \cdot 3)^2 \right] \right]} \cdot 1,60 = 3,47$$

Для інтерпретації отриманих значень інтегрального показника мінного ризику доцільно використовувати таку шкалу:

- до 2,0 – низький рівень ризику;
- 2,1–3,0 – помірний рівень ризику;
- 3,1–4,0 – високий рівень ризику;
- понад 4,0 – критичний рівень ризику.

Результати проведеного сценарного моделювання свідчать, що найвищий рівень мінного ризику характерний для урбанізованих територій (3,76), що зумовлено поєднанням високої технічної складності та значного соціального навантаження. Лісові масиви також демонструють високий рівень ризику (3,47), що обумовлено складними природними умовами та обмеженою доступністю територій. Сільськогосподарські угіддя мають дещо нижчий показник (3,16), однак також належать до категорії високого ризику, з огляду на інтенсивне використання територій та їх економічне значення.

На відміну від традиційних адитивних моделей, де інтегральний ризик для урбанізованої території склав би лише 4.1 (середнє зважене), синергетична модель акцентує увагу на критичному рівні небезпеки (3.76 за шкалою до 5), що дозволяє ідентифікувати приховані загрози, які виникають саме на перетині факторів.

Отримані результати узгоджуються із сучасними підходами до ризик-орієнтованого управління у сфері цивільного захисту та підтверджують доцільність використання інтегральних моделей як інструменту evidence-based прийняття управлінських рішень щодо пріоритезації заходів протимінної діяльності.

Таблиця 3

Вихідні параметри сценарного моделювання мінного ризику

Сценарій	T	L	S	M	w_T	w_L	w_S	w_M	σ_{syn}
Урбанізована територія	5	3	4	4	0,30	0,20	0,25	0,25	1,75
Сільськогосподарські угіддя	3	2	5	3	0,20	0,20	0,35	0,25	1,55
Лісовий масив	4	5	2	3	0,25	0,35	0,15	0,25	1,60

Примітка: складено автором для демонстрації прикладного застосування моделі.

Практичне значення запропонованої моделі полягає у можливості ранжування територій за рівнем ризику та обґрунтованої пріоритезації заходів протимінної діяльності. Такий підхід дозволяє спрямовувати обмежені ресурси на ті території, де рівень ризику є максимальним, що забезпечує підвищення ефективності управлінських рішень у системі цивільного захисту.

Крім того, модель може бути інтегрована у процеси планування протимінної діяльності та використовуватися як аналітичний інструмент підтримки прийняття рішень. Її поєднання з геоінформаційними системами (GIS) та інформаційними платформами, зокрема IMSMA, створює можливості для просторового аналізу мінної небезпеки, формування цифрових реєстрів ризику та автоматизації процесів оцінювання.

Таким чином, запропонована синергетична модель забезпечує перехід від реактивного до проактивного управління мінною небезпекою, що відповідає сучасним вимогам розвитку системи цивільного захисту.

Висновки. У статті проведено комплексне дослідження системи протимінної діяльності в Україні та розроблено математичний апарат для оцінювання ризиків у межах цивільного захисту. За результатами роботи сформульовано такі висновки:

1. Наукова новизна дослідження полягає у розробці синергетичної моделі інтегральної оцінки мінного ризику, яка, на відміну від існуючих лінійних підходів, враховує нелінійний характер взаємодії факторів. Вперше запропоновано

використання коефіцієнта синергетичного підсилення (σ_{syn}), що дозволяє формалізувати ефект взаємного обтяження технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників.

2. Доведено, що мінна небезпека є складною соціотехнічною системою. Визначено, що інтегральний ризик формується під впливом чотирьох груп факторів: технічних (характеристики ВНП), територіальних (ландшафт), соціальних (поведінка населення) та управлінських (координація та сумісність даних).

3. Результати сценарного моделювання підтвердили адекватність моделі. Встановлено, що найвищий рівень ризику (3,76) притаманний урбанізованим територіям через критичне поєднання технічної складності об'єктів та щільності населення. Лісові масиви та сільськогосподарські угіддя також демонструють високі показники ризику (3,47 та 3,16 відповідно), проте з іншою конфігурацією домінуючих факторів.

4. Практичне значення роботи полягає у створенні аналітичного інструменту для пріоритезації заходів розмінування та оптимізації ресурсів ДСНС. Запропонована модель може бути інтегрована в інформаційну систему IMSMA та геоінформаційні платформи для формування цифрових реєстрів ризику та переходу до проактивного управління мінною небезпекою.

5. Перспективи подальших досліджень пов'язані з автоматизацією збору даних для моделі за допомогою сенсорів БПЛА та вдосконаленням механізмів interoperability (інформаційної сумісності) між національними та міжнародними операторами протимінної діяльності.

ЛІТЕРАТУРА :

1. World Bank. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment 2023. Washington, 2023. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099184503212328877/> (дата звернення: 10.04.2026).
2. United Nations Mine Action Service. Mine Action Programme in Ukraine. New York, 2023. URL: <https://www.unmas.org> (дата звернення: 10.04.2026).
3. United Nations Mine Action Service. International Mine Action Standards (IMAS). New York, 2023. URL: <https://www.mineactionstandards.org> (дата звернення: 10.04.2026).
4. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Аналітичні матеріали щодо гуманітарного розмінування в Україні. Київ, 2023. URL: <https://dsns.gov.ua> (дата звернення: 10.04.2026).
5. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Mine Action in Ukraine. Geneva, 2022. URL: <https://www.gichd.org> (дата звернення: 10.04.2026).
6. United Nations Development Programme. Humanitarian Mine Action in Ukraine. New York, 2023. URL: <https://www.undp.org> (дата звернення: 10.04.2026).
7. International Organization for Standardization. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. Geneva, 2018.
8. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. European Journal of Operational Research. 2016. Vol. 253, No. 1. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.12.023.
9. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Explosive Ordnance Risk Education. Geneva, 2019. URL: <https://www.gichd.org> (дата звернення: 10.04.2026).
10. Renn O. Advanced risk governance. Risk Analysis. 2020. Vol. 40, No. 11. P. 2191–2207. DOI: 10.1111/risa.13506.

11. United Nations Development Programme. Mine Action for Sustainable Development. New York, 2021. URL: <https://www.undp.org> (дата звернення: 10.04.2026).
12. Kaplan S., Garrick B. J. On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*. 1981. Vol. 1, No. 1. P. 11–27. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x.
13. Haimes Y. Y. *Risk Modeling, Assessment, and Management*. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2021. DOI: 10.1002/9781119759638.
14. Закон України «Про протимінну діяльність в Україні» від 06.12.2018 № 2642-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19> (дата звернення: 10.04.2026).
15. UNDRR. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022*. Geneva, 2022. URL: <https://www.undrr.org> (дата звернення: 10.04.2026).
16. European Commission. *Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management*. Brussels, 2010. URL: <https://ec.europa.eu> (дата звернення: 10.04.2026).
17. Aven T., Zio E. Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 193. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106110.
18. Renn O., Klinke A. Systemic risks: characteristics and management approaches. *Journal of Risk Research*. 2021. Vol. 24, No. 3–4. P. 451–468. DOI: 10.1080/13669877.2020.1750461.

REFERENCES :

1. World Bank. (2023). *Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment 2023*. Washington. Available at: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099184503212328877/>
2. United Nations Mine Action Service. (2023). *Mine Action Programme in Ukraine*. New York. Available at: <https://www.unmas.org>.
3. United Nations Mine Action Service. (2023). *International Mine Action Standards (IMAS)*. New York. Available at: <https://www.mineactionstandards.org>.
4. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2023). *Analychni materialy shchodo humanitarnoho rozminuvannia v Ukraini* [Analytical materials on humanitarian demining in Ukraine]. Kyiv. Available at: <https://dsns.gov.ua> [in Ukrainian].
5. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. (2022). *Mine Action in Ukraine*. Geneva. Available at: <https://www.gichd.org>.
6. United Nations Development Programme. (2023). *Humanitarian Mine Action in Ukraine*. New York. Available at: <https://www.undp.org>.
7. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines*. Geneva.
8. Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.12.023.
9. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. (2019). *Explosive Ordnance Risk Education*. Geneva. Available at: <https://www.gichd.org>.
10. Renn, O. (2020). Advanced risk governance. *Risk Analysis*, 40(11), 2191–2207. DOI: 10.1111/risa.13506.
11. United Nations Development Programme. (2021). *Mine Action for Sustainable Development*. New York. Available at: <https://www.undp.org>.
12. Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, 1(1), 11–27. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x.
13. Haimes, Y. Y. (2021). *Risk Modeling, Assessment, and Management* (5th ed.). Hoboken: Wiley. DOI: 10.1002/9781119759638.
14. Zakon Ukrainy "Pro protyminnu diialnist v Ukraini" [Law of Ukraine "On Mine Action in Ukraine"] No. 2642-VIII. (2018). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19> [in Ukrainian].
15. UNDRR. (2022). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022*. Geneva. Available at: <https://www.undrr.org>.
16. European Commission. (2010). *Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management*. Brussels. Available at: <https://ec.europa.eu>.
17. Aven, T., & Zio, E. (2020). Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making. *Reliability Engineering & System Safety*, 193. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106110.
18. Renn, O., & Klinke, A. (2021). Systemic risks: characteristics and management approaches. *Journal of Risk Research*, 24(3–4), 451–468. DOI: 10.1080/13669877.2020.1750461.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 13.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 331.45

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-32>

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ У МОРСЬКИХ ПОРТАХ НА ОСНОВІ ДВОКОНТУРНОЇ МОДЕЛІ ПОРТ-Р

Майстренко Володимир Володимирович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-9827-0460

Кружилко Олег Євгенович,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0000-7734-1661

Овчинніков Олексій Олександрович,

здобувач вищої освіти групи БП-22-16

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0003-1539-513X

Каракай Максим Сергійович,

кандидат наук з державного управління,

в.о. завідувача кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0008-2257-0158

Чеберячко Юрій Іванович,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;

професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-7307-1553

У статті розглянуто проблему обмеженої придатності класичних методів оцінювання професійних ризиків для умов портів, де рівень небезпеки суттєво залежить від просторово-часової мінливості виробничого середовища. Метою дослідження є порівняльний аналіз наявних інструментів оцінювання ризику та розроблення авторської моделі динамічного оцінювання професійних ризиків у портах. У роботі використано системний і порівняльний аналіз, сценарне моделювання, а також елементи матричних і аналітичних методів оцінювання ризику. Запропоновано двоконтурну модель ПОРТ-Р, яка поєднує статичний «Паспорт ділянки» з оперативним динамічним чек-листом на основі п'яти макрозмінних: техніка, персонал, середовище, вантаж, бар'єри. Логіка моделі базується на виявленні відхилень від штатного режиму, застосуванні компенсаторних бар'єрів та ескалації управлінських рішень відповідно до концепції ALARP. Аргументацію працездатності моделі здійснено на основі масиву з понад 300 типових ризик-ситуацій. Наукова новизна полягає у розробленні моделі, що переводить результат статичного інженерного аналізу в оперативне рішення безпосередньо на місці виконання робіт, а також у впровадженні аналітичної петлі зворотного зв'язку для проактивного перекалібрування базових заходів безпеки на основі накопиченої статистики відхилень. Повномасштабна виробнича верифікація моделі потребує окремого етапу впровадження на рівні підприємства.

Ключові слова: професійний ризик, оцінювання ризику, морський порт, бар'єри безпеки, ALARP, ПОРТ-Р, система управління охороною праці.

Maistrenko Volodymyr, Kruzhilko Oleg, Ovchynnikov Oleksii, Karakai Maksym, Cheberyachko Yuriy. Scientific and methodological principles of assessing occupational risks in seaports based on the two-circuit PORT-R model

The article considers the problem of limited applicability of classical methods of assessing occupational risks for port conditions, where the level of danger significantly depends on the spatio-temporal variability of the production

environment. The purpose of the study is a comparative analysis of existing risk assessment tools and the development of an author's model of dynamic assessment of occupational risks in ports. The work uses system and comparative analysis, scenario modeling, as well as elements of matrix and analytical methods of risk assessment. A two-loop model PORT-R is proposed, which combines a static "Site Passport" with an operational dynamic checklist based on five macrovariables: equipment, personnel, environment, cargo, barriers. The logic of the model is based on the detection of deviations from the standard mode, the application of compensatory barriers and the escalation of management decisions in accordance with the ALARP concept. The argumentation of the model's operability is carried out on the basis of an array of over 300 typical risk situations. The scientific novelty lies in the development of a model that translates the result of static engineering analysis into an operational solution directly at the site of work, as well as in the implementation of an analytical feedback loop for proactive recalibration of basic safety measures based on accumulated deviation statistics. Full-scale production verification of the model requires a separate stage of implementation at the enterprise level.

Key words: occupational risk, risk assessment, seaport, safety barriers, ALARP, PORT-R, occupational safety management system.

Вступ. Дослідження спрямоване на розв'язання практичної проблеми розриву між глибиною статичного інженерного аналізу ризиків та потребою в оперативному управлінському рішенні безпосередньо на місці виконання робіт у морських портах. Класичні методи оцінювання ризику ефективні для регламентування та проектування безпечної роботи [1; 2]. Проте через мінливі умови вони мають обмеження. Коли параметри на ділянці змінюються (погіршується видимість, з'являються сторонні особи або частково деградують бар'єри) – статична оцінка перестає відповідати фактичним умовам. Лінійний керівник фізично не має ресурсу проводити повноцінний аналітичний розрахунок у реальному часі. Якщо формалізованого механізму переоцінки немає – рішення приймається суб'єктивно.

Запропоновано двоконтурну модель ПОРТ-Р. Базовий рівень ризику фіксується статично. Вплив суб'єктивного фактора під час прийняття рішень мінімізовано: поточний стан зіставляється із заздалегідь визначеними тригерами, і якщо фіксується відхилення – вимагається активація компенсаторного бар'єра.

Метою дослідження розроблення моделі динамічного оцінювання професійних ризиків у морських портах, яка переводить результат попереднього інженерного аналізу в оперативне рішення у виробничій зоні.

Матеріали та методи досліджень. Відповідно до [3], техніки оцінювання ризику не є універсально взаємозамінними: їх вибір має залежати від контексту, мети оцінювання та рівня складності системи. Для портів це особливо важливо, оскільки тут одночасно поєднуються транспортні, вантажні, складські, технічні та організаційні ризики, а умови можуть змінюватися протягом однієї зміни або, навіть, однієї години. Порівняльний аналіз класичних методів дозволяє виявити їхні сильні сторони та обмеження в динамічному середовищі, результати наведено в таблиці 1.

Порівняльний аналіз доводить: жоден із наведених методів не забезпечує повністю той формат оцінювання, який потрібен для морських портів. Разом ці методи утворюють сильний аналітичний інструментарій, але розв'язують переважно завдання попереднього структурованого аналізу або поглибленого дослідження окремих сценаріїв.

Виробнича реальність порту потребує швидкого, повторюваного та формалізованого механізму оцінювання поточних змін безпосередньо на місці виконання робіт. У портах рівень небезпеки змінюється не лише через глобальні технологічні чи організаційні чинники, а й через раптові поточні відхилення: обмеження огляду, часткову втрату бар'єрів, зміну конфігурації робочої зони, появу суміжних робіт, нестандартний стан вантажу, втому персоналу або порушення комунікації, повітряні тривоги.

Ключова науково-практична проблема полягає в наявності критичного розриву між глибиною класичного інженерного аналізу ризику та потребою в оперативному управлінському рішенні. Класичні методи якісно описують небезпеки, але не дають лінійному керівникові достатньо простий і водночас обґрунтований механізм, який дозволяє швидко відповісти на практичне питання: чи можна продовжувати роботу в поточних умовах, чи потрібно посилити бар'єри, змінити організацію робіт або повністю її зупинити. Саме ця суперечність робить необхідним розроблення комбінованої моделі, яка не заперечує класичні підходи, а інтегрує їх сильні сторони в більш придатну для портів архітектуру.

Емпіричну основу дослідження становить сформований під час аналізу реальних виробничих процесів реєстр з понад 300 типових ризик-ситуацій, кожна позиція якого як конкретний виробничий сценарій із фіксацією джерела, умов реалізації та наслідків. Це забезпечує однакову одиницю спостереження для подальшого порівняльного аналізу.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз методів оцінювання ризиків

Назва	Переваги	Недоліки / Обмеження
Матричний метод	Зручна для первинного скринінгу, побудови реєстрів та планування заходів	Сама по собі матриця є статичною, не фіксує механізму зміни ризику в реальному часі та не відображає достатньою мірою стан бар'єрів безпеки
PHA / HAZID	Системоутворюючий інструмент для первинної ідентифікації небезпек і формування структурованого реєстру на рівні термінала.	Менш придатний для фіксації швидких локальних змін під час безпосереднього виконання робіт
JSA / JHA	Корисний для розкладання високоризикових операцій на послідовні етапи	За великої кількості щоденних операцій підтримка бібліотеки є трудомісткою, а за формального підходу метод стає шаблоном, який заповнюється без фактичного аналізу поточних умов
SWIFT	Сильний сценарний підхід для швидкого переведення зміни обстановки у форму запитань («що буде, якщо погіршиться видимість»).	Результати істотно залежать від суб'єктивного досвіду учасників і метод зазвичай потребує додаткового зв'язку з формалізованою шкалою ранжування ризику
Bow-Tie	Візуалізує логіку бар'єрного захисту від важкого інциденту (падіння вантажу, пожежа)	Відносно трудомісткий метод, який не призначений для масового щоденного аналізу великої кількості дрібних змінних операцій
FMEA	Забезпечує інженерну глибину при аналізі потенційних видів відмов технічних компонентів	Вимагає значного часу і фахової підготовки, тому малопридатний для швидкого застосування безпосередньо під час зміни
FTA	Підхід, корисний для аналітики серйозних інцидентів та реконструкції причинно-наслідкових ланцюгів.	Як щоденний інструмент оперативного оцінювання ризику на робочому місці є занадто складним і повільним
HAZOP	Дозволяє глибоко проаналізувати можливі відхилення у стабільних технологічних вузлах	Для щоденного оцінювання великої кількості рухомих, різномірних і швидкозмінних робіт у порту цей метод є надто ресурсомістким

Реєстр із понад 300 типових ризик-ситуацій є достатнім для логіко-аналітичного та сценарного моделювання, проте сам по собі не замінює повномасштабної практичної перевірки моделі в реальних виробничих умовах. Масив має фіксований характер. Якщо виробнича ситуація розвивається нетипово – реєстр відображає лише стандартизовані сценарії, а не повний спектр усіх можливих змін у реальному часі. Таким чином, практичні дані є достатнім фундаментом для побудови, логічного тестування та обґрунтування моделі ПОРТ-Р, але не розглядаються як остаточне підтвердження їх універсальної ефективності за будь-яких умов експлуатації.

Результати досліджень. Аналітична обробка даних з емпіричного масиву (понад 300 типових ризик-ситуацій) дозволила виявити ключову закономірність: абсолютна більшість інцидентів у порту виникає не через появу принципово нових небезпек, а внаслідок деградації поточних умов виконання штатної операції.

У межах дослідження зазначений реєстр використовується як центральна емпірична база, що виконує чіткі прикладні функції:

- виділення репрезентативних виробничих ситуацій для різних видів портових операцій;

- логічна перевірка архітектури моделі ПОРТ-Р шляхом зіставлення класів ризиків із макрозмінними: техніка, персонал, середовище, вантаж, бар'єри;

- формування базових сценаріїв для відстеження зміни управлінського рішення;

- аналіз переходів між зонами ризику (зелена, жовта, червона). Якщо фіксується відхилення умов виконання робіт – масив дозволяє змодельовувати зміну статусу контролюваності.

Аналіз свідчить, що цього набору достатньо для ідентифікації будь-якого стандартного поточного відхилення в оперативному контурі, що дозволяє не перевантажувати лінійного керівника складним пофакторним інженерним аналізом на робочому місці.

Архітектура ПОРТ-Р усуває методологічний конфлікт між глибиною аналізу та швидкістю реагування завдяки розмежуванню двох контурів (рівнів) роботи.

1. Статичний контур («Паспорт ділянки»): еталонна фіксація базових умов безпечного виконання робіт. Інженер з охорони праці визначає типові небезпеки, базовий ризик та вихідні бар'єри; цей контур формує «норму» і переглядається лише у разі зміни технології або після інцидентів.

2. Динамічний контур (Оперативний чек-лист): інструмент швидкого виявлення поточних відхилень від штатного режиму та їх переведення в управлінське рішення безпосередньо лінійним керівником.

Щоб динамічний контур не перетворився на хаотичну перевірку, модель спирається на систему з п'яти макрозмінних, які охоплюють джерела втрати керованості:

- техніка (Т): стан, справність обладнання та просторова динаміка рухомої техніки. Якщо фіксується відмова механізму, заміна заявленого типу машини або непередбачена поява чи рух транспортних засобів у зоні виконання робіт – фіксується відхилення;

- персонал (П): кількісний/якісний склад, дотримання ролей. Якщо в небезпечній зоні з'являються сторонні особи – алгоритм вимагає реакції;

- середовище (С): погодні та зовнішні умови (видимість, слизькість покриття, вітер);

- вантаж (В): фактичний стан предмета праці (цілісність пакування, зміщення центру ваги, розлив, нестандартні вантажі);

- бар'єри (Б): огороження, візуальна розмітка, засоби зв'язку, сигнальні та ЗІЗ. Якщо розмітка стає нерозрізненною втрачається комунікація або виявлено відсутність/пошкодження ЗІЗ у зоні робіт – фіксується деградація бар'єрного захисту.

Змішування аналітичної та виконавчої функцій породжує бюрократизацію або небезпечну імпровізацію. ПОРТ-Р передбачає жорсткий Розподіл ролей в процесі прийняття рішень щодо забезпечення безпеки:

- інженер з охорони праці: здійснює попереднє налаштування, формує «Паспорт ділянки», визначає порогові умови та набір компенсаторних бар'єрів. Формує затверджений базовий рівень ризику;

- керівник робіт (стивідор): оперативно застосовує модель. Якщо виявлено зміну умов – він звіряє фактичний стан із параметрами статичного контуру та діє за алгоритмом, знімаючи із себе роль аналітика-розраховувача.

Логіка прийняття рішень передбачає три альтернативи: продовження робіт, їх обмеження із застосуванням додаткових бар'єрів або повну зупинку. Модель реалізує принцип ALARP, забезпечуючи переведення оцінки ризику у практичну площину управління. Логіка прийняття рішення побудована як послідовність кроків, що інтегрує принцип ALARP:

1. Виявлення відхилення: Фіксація факту відхилення від раніше встановленої «норми» за будь-якою з макрозмінних.

2. Оцінювання впливу: Співвіднесення відхилення із заздалегідь визначеними зонами та тригерами.

3. Активація компенсаторного бар'єра: Якщо відхилення переводить ситуацію в зону підвищеної небезпеки – система автоматично вимагає застосування додаткового заходу (наприклад, додаткового сигнального або обмеження швидкості).

4. Рішення: Фінальна дія лінійного керівника має лише три легітимні варіанти:

- Продовжити роботу (стан контрольований).

- Обмежити/скоригувати роботу (через активацію бар'єрів).

- Зупинити роботу (якщо спрацював критичний тригер або втрачено ключовий бар'єр)

Обчислення динамічного ризику (R_{dyn}) у моделі ПОРТ-Р базується на мультиплікативній залежності:

$$R_{dyn} = R_{base} \times K_T \times K_P \times K_C \times K_V \times K_B \times K_{comp}, \quad (1)$$

де: R_{base} – базовий індекс ризику штатної операції; K_T , K_P , K_C , K_V , K_B – відповідно коефіцієнти деградації за макрозмінними (Техніка, Персонал, Середовище, Вантаж, Бар'єри); K_{comp} – знижувальний множник компенсаторного бар'єра (інструмент «активної безпеки», який дозволяє повернути ризик у прийнятну зону за рахунок додаткових ресурсів: $K_{comp} < 1,0$).

Коефіцієнти (K_T , K_P , K_C , K_V , K_B) відображають ступінь деградації безпеки за макрозмінними (Т–П–С–В–Б). Замість жорсткої математичної прив'язки до статичних матриць, модель ПОРТ-Р використовує контекстно-залежну експертну оцінку, яка формується інженерною службою на етапі розроблення «Паспорта ділянки».

За основу береться принцип: базовий (штатний) стан оцінюється як нейтральний множник 1,0. Крок коефіцієнта становить 0,1, що логічно еквівалентно втраті 10 % запасу міцності (керованості) системи при появі нетипового фактора.

Такий підхід найбільш придатний для врахування просторової специфіки порту. Наприклад, деградація за макрозмінною «Середовище» (атмосферні опади у вигляді зливи) для відкритого причалу може отримати коефіцієнт $K_C = 1,4$ (суттєве підвищення ризику ковзання техніки та погіршення видимості). Водночас для критого складського комплексу цей самий фактор матиме коефіцієнт $K_C = 1,0$ (нейтральний вплив, відсутність деградації).

Поділ на діапазони (зони) у ПОРТ-Р – це механізм переведення оцінки в конкретне управлінське рішення:

– зелена зона ($R_{dyn} \leq 1,40$): охоплює базовий рівень ризику штатної операції. Робота продовжується.

– жовта зона ($1,41 \leq R_{dyn} \leq 1,80$): система вийшла з базового режиму (з'явилися відхилення), але ще піддається утриманню. Якщо фіксується перехід у цю зону – алгоритм автоматично вимагає активації компенсаторних бар'єрів.

– червона зона ($R_{dyn} \geq 1,81$): рівень втрати прийнятності ризику. Подальше виконання робіт не відповідає ALARP і підлягає негайній зупинці.

Обґрунтування підходу. Кумулятивний ефект та синергія: на відміну від адитивних моделей (додавання), множення відображає реальну фізику портових інцидентів, де несприятливі умови не просто сумуються, а підсилюють одна одну. Наприклад, три «незначні» відхилення з кроком 0,2 ($1,2 \times 1,2 \times 1,2 = 1,73$) створюють вищий рівень небезпеки, ніж їхня арифметична сума ($1 + 0,2 + 0,2 + 0,2 = 1,6$). Це дозволяє моделі ідентифікувати критичну масу дрібних помилок до моменту настання інциденту.

Дискретність та поріг чутливості: використання кроку 0,1 відповідає втраті 10% операційної стійкості системи. Це мінімально значущий інженерний поріг деградації. Множення дозволяє зберігати значення 1,0 як нейтральний еталон: якщо фактор перебуває у штатному стані, він не змінює підсумкову оцінку.

Автоматичний запобіжник: Максимальне значення коефіцієнта 2,0 (подвоєння ризику) виступає математичним «стоп-краном», що гарантовано виводить операцію в «червону зону», вимагаючи негайної зупинки робіт.

Запропоновані числові значення базового індексу та коефіцієнтів розглядаються як елементи попереднього інженерного калібрування моделі. Математична частина ПОРТ-Р виконує функцію «невидимого двигуна», який налаштовується інженерами, тоді як лінійний керівник оперує лише готовими тригерами. Це робить концепцію відкритою для подальшого емпіричного уточнення на основі накопичення статистики інцидентів.

Практичне застосування моделі продемонстровано на прикладі типової ситуації – налив танкера паливом (хімічний ризик та деградація середовища).

Вихідною точкою є штатний режим («Паспорт ділянки»). Якщо фіксується поява відхилень за макрозмінними Т-П-С-В-Б – алгоритм перераховує зону ризику та вимагає активації компенсаторних бар'єрів.

Вихідні умови: Наявне перевірене шлангове з'єднання, заземлення, стабільний зв'язок

($K_{т}=1,1$; $K_{п}=1,0$; $K_{с}=1,0$; $K_{в}=1,0$; $K_{б}=1,0$), базовий ризик ($R_{base}=1,0$). $R_{dyn}=1,1$ перебуває в зеленій зоні (контрольований стан).

Зміна факторів: Посилення вітру, погіршення видимості через мряку, поява стійкого запаху нафтопродукту.

Макрозмінні: Деградація за блоками «Середовище» (С) та «Бар'єри» (Б).

Підсумкова зона: Коефіцієнти деградації ($K_{с}=1,4$, $K_{б}=1,1$) збільшують динамічний ризик ($R_{dyn}=1,69$). Перехід у жовту зону.

Управлінське рішення: Негайне обмеження інтенсивності наливу та активація компенсаторних бар'єрів ($K_{comp}=0,9$): посилення газового контролю, локалізація зони.

Ескалація: Якщо ознаки витoku не зникають або з'являється небезпека займання ($K_{в}=1,3$) – ситуація переходить у червону зону ($R_{dyn}=1,98$), повна зупинка наливу.

Обговорення результатів. Отримані результати підтверджують, що запропонована модель ПОРТ-Р здатна зменшити методологічний розрив між інженерним аналізом та прийняттям рішень у зоні виконання робіт. На відміну від класичних інструментів, які формують переважно статичний реєстр небезпек, алгоритм переводить оцінювання ризику у площину оперативного керування. Це об'єктивно зменшує частку ситуативних інтуїтивних рішень, оскільки лінійний керівник отримує формалізовані тригери. Архітектура моделі чітко розділяє функціональні обов'язки: інженер готує еталонні параметри, а стивідор працює виключно з фіксацією відхилень.

Водночас на поточному етапі розроблений протокол лише обґрунтовує концептуальну працездатність підходу. Модель не подається як остаточно завершений універсальний інструмент. Для її переходу від логіко-аналітичного обґрунтування до промислової експлуатації необхідне накопичення статистичної бази та уточнення ваги макрозмінних в умовах реального підприємства.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що існуючі методи оцінювання ризиків не забезпечують належної підтримки оперативного управління безпекою в умовах динамічного виробничого середовища морських портів. Запропонована модель ПОРТ-Р усуває цей розрив шляхом інтеграції інженерного аналізу та алгоритмізованого прийняття рішень на рівні виробничої ділянки. Наукова новизна полягає у формуванні універсальної системи макрозмінних та впровадженні мультиплікативного підходу до оцінювання динамічного ризику, що дозволяє враховувати синергетичний ефект

небезпечних факторів. Практична цінність моделі полягає у зниженні частки інтуїтивних рішень і підвищенні обґрунтованості управлінських дій.

Разом із тим результати мають обмеження, пов'язані з відсутністю повномасштабної

виробничої апробації та попереднім характером параметризації. Подальші дослідження доцільно спрямувати на верифікацію моделі в реальних умовах, уточнення коефіцієнтів та інтеграцію ПОРТ-Р у цифрові системи управління охороною праці.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Kruzhilko O., Mahmoud AED, Maystrenko V., Volodchenkova N., Polukarov O., Sydorenko V., Pruskyi A., Arlamov O. Scientific Support of Occupational Risk Management Decisions in Industrial Sectors in Case of Uncertainty. *Inttrnational Jornal Occupational Safety Health*. Volume 13. No 3 (2023). 223-233. DOI: <https://doi.org/10.3126/ijosh.v13i2.48456>
2. Бочковський А. П., Сапожнікова Н. Ю., Пуріч В., Чеботар С. Напрями мінімізації причин виникнення професійних ризиків в Україні. *Проблеми охорони праці в Україні*. 41(1-2). 2025. С. 29-38. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.41-1-2.2025.29-38>.
3. ДСТУ ІЕС/ІСО 31010:2013 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ІСО 31010:2009, ІДТ) URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66723 (дата звернення: 08.04.2026).

REFERENCES:

2. Kruzhilko, O., Mahmoud, A. E. D., Maystrenko, V., Volodchenkova, N., Polukarov, O., Sydorenko, V., Pruskyi, A., & Arlamov, O. (2023). Scientific support of occupational risk management decisions in industrial sectors in case of uncertainty. *International Journal of Occupational Safety and Health*, 13(3), 223–233. DOI: <https://doi.org/10.3126/ijosh.v13i2.48456>
3. Bochkovskyi, A. P., Sapozhnikova, N. Yu., Purich, V., & Chebotar, S. (2025). Directions for minimizing the causes of occupational risks in Ukraine. *Problems of Occupational Safety in Ukraine*, 41(1–2), 29–38. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.41-1-2.2025.29-38>
3. DSTU IEC/ISO 31010:2013. (2013). *Risk management–Risk assessment techniques (IEC/ISO 31010:2009, IDT)*. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66723



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 11.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 331.45:614.8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-33>

РОЗРАХУНОК РИЗИКУ ТРАВМАТИЗМУ ПРАЦІВНИКІВ ВІД ВТОМИ

Столбченко Олена Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-2003-4382

Лісовицька Ірина Анатоліївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;
старший науковий співробітник лабораторії з безпеки життєдіяльності,
інженерії та інших технічних досліджень
Дніпропетровського науково-дослідного інституту судових експертиз
ORCID ID: 0000-0002-9599-3492

Надточий Володимир Валентинович,

старший викладач кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3987-5608

Лапко Кирило Андрійович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0008-3984-686X

Мета дослідження – виявлення та математичне обґрунтування причинно-наслідкового зв'язку між розвитком втоми у працівників об'єктів критичної інфраструктури та зростанням рівня виробничого травматизму.

Методика: Використано адаптовану модель «швейцарського сиру» для розрахунку ймовірності відмови захисних бар'єрів. Встановлено, що ймовірність відмови бар'єрів зростає в 4–16 разів під впливом військових та психосоціальних чинників.

У статті проведено кількісну оцінку ризику виробничого травматизму працівників критичної інфраструктури, спричиненого хронічною втомою. Для моделювання використано адаптовану модель «швейцарського сиру» у поєднанні з методиками Layer of Protection Analysis (LOPA) та Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART). Визначено ймовірності відмови організаційних, фізіологічних, діагностичних та технічно-наглядових бар'єрів у стресових умовах воєнного стану. Проведено розрахунок коефіцієнтів зростання ймовірності помилок під впливом військових, метеорологічних та психосоціальних чинників. Встановлено, що загальний ризик травматизму сягає 3,6–16,8% на одну критичну операцію, що відповідає критично неприйнятному рівню.

Результати: Загальний ризик травматизму становить 3,6–16,8% на одну критичну операцію, що відповідає критично неприйнятному рівню. Доведено, що чинна організація праці (60-годинний робочий тиждень, відсутність ротації) є основним детермінантом зростання травматизму в енергетичному секторі України у 2025–2026 роках.

Наукова новизна: Адаптація моделі «швейцарського сиру» для оцінки конвергенції військових, метеорологічних та психосоціальних чинників.

Практична цінність: Розроблено рекомендації для збереження кадрового потенціалу, зокрема обов'язкова ротація, медичний скринінг, перегляд Закону № 2136-IX.

Ключові слова: втома, ризик травматизму, модель «швейцарського сиру», працівники, критична інфраструктура, воєнний стан.

Stolbchenko Olena, Lisovytska Irina, Nadtochy Volodymyr, Lapko Kyrylo. Calculation of the risk occupational injury due to fatigue

The purpose of the study is to identify and mathematically substantiate the cause-and-effect relationship between the development of fatigue in workers of critical infrastructure facilities and the increase in the level of occupational injuries.

Methodology: An adapted Swiss cheese model was used to calculate the probability of failure of protective barriers. It was found that the probability of failure of barriers increases by 4–16 times under the influence of military and psychosocial factors.

The article provides a quantitative assessment of the risk of occupational injuries of critical infrastructure workers caused by chronic fatigue. An adapted Swiss cheese model was used for modeling in combination with the Layer of Protection Analysis (LOPA) and Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) methods. The probabilities of failure of organizational, physiological, diagnostic, and technical and supervisory barriers in the stressful conditions of martial law were determined. The coefficients of error probability growth under the influence of military, meteorological, and psychosocial factors were calculated. It was established that the total risk of injury reaches 3.6–16.8% per critical operation, which corresponds to a critically unacceptable level.

Results: The overall risk of injury is 3.6–16.8% per critical operation, which corresponds to a critically unacceptable level. It is proven that the current labor organization (60-hour work week, no rotation) is the main determinant of the increase in injury rates in the energy sector of Ukraine in 2025–2026.

Scientific novelty: Adaptation of the «Swiss Cheese Model» model to assess the convergence of military, meteorological and psychosocial factors.

Practical value: Recommendations have been developed to preserve personnel potential, including mandatory rotation, medical screening, and revision of Law No. 2136-IX.

Key words: fatigue, injury risk, Swiss Cheese model, workers, critical infrastructure, martial law.

Актуальність. У сучасних умовах повномасштабної збройної агресії російської федерації проти України проблема зниження ризику травматизму від втоми працівників набуває виняткової гостроти та стратегічного значення для національної безпеки, стабільності економіки та збереження людського капіталу. Воєнний стан радикально трансформує умови праці, посилюючи традиційні виробничі ризики психо-емоційним напруженням, дефіцитом кадрових ресурсів, подовженням робочим часом та постійною загрозою бойових дій. За даними системного аналізу професійного здоров'я населення України, у 2024 році на підприємствах країни травми отримали 3509 працівників, що на 405 осіб більше порівняно з 2023 роком, а кількість випадків зі смертельними наслідками склала 493 (зростання на $30,40 \pm 2,07\%$ від початку війни). За період 2022–2024 років зафіксовано 2157 випадків травмування працівників під час виконання обов'язків у зоні бойових дій, з яких 592 (27,4%) мали летальні наслідки; медіанне значення коефіцієнта смертельних випадків у таких умовах сягнуло 0.30 проти 0.06 у мирний час.

Одним із провідних чинників зростання виробничого травматизму є хронічна втома працівників, спричинена емоційним виснаженням та вигоранням [1;2;3]. Воєнні умови – постійні повітряні тривоги, інформаційне перевантаження, порушення сну, стрес від загрози життю та необхідність працювати в умовах кадрового дефіциту – призводять до когнітивної втоми, зниження концентрації уваги, уповільнення реакції та некритичного сприйняття ризиків. Емоційне виснаження проявляється у швидкій втомлюваності,

дратівливості, порушеннях пам'яті та працездатності, що безпосередньо підвищує ймовірність аварій і нещасних випадків на виробництві [4;5]. Традиційні підходи до управління ризиками, розроблені для мирного часу, не враховують специфіку воєнних факторів, таких як посттравматичний стресовий розлад і хронічне психоемоційне перевантаження, що робить існуючі нормативно-правові механізми охорони праці недостатньо ефективними [6].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю наукового обґрунтування нових методів і технологій зниження ризику травматизму від втоми працівників саме в умовах воєнного стану. Збереження трудових ресурсів у критичних галузях (енергетика, транспорт, оборонна промисловість, агропромисловий комплекс) є запорукою економічної стійкості та обороноздатності держави. Водночас проблема залишається малодослідженою: відсутні комплексні моделі оцінки втоми з урахуванням воєнних стресорів, інтегровані системи моніторингу психофізіологічного стану працівників та адаптовані програми профілактики. Розробка таких заходів дозволить не лише зменшити кількість нещасних випадків, а й мінімізувати соціально-економічні втрати, пов'язані з інвалідизацією та смертністю трудового потенціалу.

Таким чином, дослідження проблеми зниження ризику травматизму від втоми працівників у воєнний час є не лише науково обґрунтованим, а й соціально значущим завданням, що відповідає стратегічним пріоритетам державної політики у сфері охорони праці, охорони здоров'я та національної безпеки України.

Аналіз літературних джерел. У статті [7] автори провели дослідження з визначення ризику втоми у різних галузях (авіація, транспорт, пожежники) на основі проведення тестування респондентів та виявлення їх фізіологічних змін в поведінці. В результаті були розроблені рекомендації для зміни в системі управління безпекою праці через покращення навчання працівників та посилення культури безпеки.

У статті [8] автори визначили, що втома значно погіршує контроль вестибулярного апарату працівника, що призводить до частих падінь на будівництві. На основі моделі DTW-аналізу було встановлено зростання ризику падіння через втому у 3–4 рази, особливо на слизьких поверхнях. Як рекомендації було зазначено необхідність забезпечення індивідуального моніторингу втоми через застосування фітнестрекерів та впровадження ротації відповідно до важкості роботи.

У статті [9] автори розглянули причини накопичення втоми у працівників транспортної сфери. Зазначено, що втома є ключовим небезпечним чинником інцидентів та травм, а її накопичення підвищує ризик травмування на 50%. Автори наголошують на важливості застосування біоматематичних моделей для прогнозування втоми та обов'язковому обмеженні тривалості робочих змін.

У статті [10] автор розкриває теоретичні основи методу аналізу шарів захисту (LOPA), який дозволяє оцінити ефективність існуючих бар'єрів безпеки та визначити ймовірність виникнення небажаної події. Цей підхід є критично важливим для математичного моделювання ризиків, оскільки дозволяє кількісно оцінити кожен ланку захисної системи.

У статті [11] автори детально аналізують класичну модель «швейцарського сиру» (Swiss Cheese Model) та її застосування для аналізу людського чинника. Модель пояснює, як системні помилки та латентні умови на різних рівнях організації праці, збігаючись у часі, призводять до катастрофічних наслідків та травматизму.

Мета та методи дослідження.

Мета статті полягає у виявленні причинно-наслідкового зв'язку між втомою працівників та зростанням рівня виробничого травматизму в умовах екстремальних навантажень.

Методи дослідження. Для моделювання механізму виникнення травматизму використано модель «швейцарського сиру» (Swiss Cheese Model), яка пояснює виникнення інцидентів як результат проходження небезпеки крізь «отвори» (недоліки) у послідовних бар'єрах

захисту [11]. У дослідженні виокремлено чотири рівні (шари) захисту, що запобігають розвитку синдрому хронічної кумулятивної втоми:

- можливість відпочинку: організаційний бар'єр (планування графіків, ліміти робочого часу, обов'язкова ротація);
- фактичний відпочинок: фізіологічний бар'єр (реальне відновлення організму з урахуванням стресорів: шуму, холоду, переривання сну через обстріли);
- моніторинг втоми: діагностичний бар'єр (система раннього виявлення зниження концентрації та уповільнення реакцій через психофізіологічні тести);
- моніторинг помилок: технічно-наглядний бар'єр (відеоспостереження, системи контролю стану, взаємоконтроль у бригадах).

У контексті воєнного стану ці бар'єри зазнають деградації через дію специфічних чинників: законодавче скасування обмежень робочого часу (Закон № 2136-IX), кадрову кризу та постійний психологічний тиск.

Для кількісної оцінки ризику травматизму від ймовірності відмови зазначених шарів використано методику Layer of Protection Analysis (LOPA) [10], за якою загальний ризик обчислюється як добуток ймовірностей відмов кожного бар'єру:

$$R = \prod_{i=1}^n P_i$$

де R – ризик травматизму; P_i – ймовірність відмови, кожного з чотирьох захисних шарів представлених в моделі швейцарського сиру.

Для визначення ймовірності відмови шарів використовувалася комбінація емпіричних даних та рекомендаціями методу для оцінювання ризиків «Аналіз шарів захисту» (Layer of Protection Analysis - LOPA), що широко використовується оцінювання сценаріїв небезпечних подій. Передбачається, що величина відмови захисного шару знаходиться на рівні 0.05–0.1 (5–10%, за моделлю LOPA для простих дій працівників) при цьому оціночна шкала знаходиться в діапазоні від 0 до 1 [10]. У стресових умовах (втома, холод) ймовірність відмови захисного шару може знизитись до 0.4–0.5 (40–50%) [10].

На об'єктах критичної інфраструктури, де наявні латентні чинники (дефіцит часу) – ймовірність відмови може досягти до позначки 0,6–0,8. В таблиці 1 наведені величини відмов шарів захисту з відповідним обґрунтуванням наявних досліджень.

Для визначення величини збільшення ймовірності відмови захисного шару від впливу трьох груп небезпечних чинників скористаємось методом Human Error Assessment and

Reduction Technique (HEART), який дозволив встановити коефіцієнт зростання ймовірності відмови захисних шарів через прояв людської помилки за формулою:

$$\text{КПП} = \text{ЙПр} / \text{ЙПб}$$

де ЙПр – ймовірність реальної кількості помилок від наявних умов середовища; ЙПб – ймовірність базової кількості помилок.

Ймовірність людської помилки розрахуємо за формулою [1]:

$$\text{ЙП} = (\text{ЕПС} - 1) \times \text{АРОА} + 1$$

де ЙП – ймовірність людської помилки; ЕПС – умови за яких відбувається помилка;

АРОА – частка впливу середовища на помилку (оцінюється експертом від 0 до 1).

Для визначення оцінки ризику травматизму була побудована шкала з урахуванням рекомендацій ССПС та вимог до об'єктів критичної інфраструктури (ІЕС 61511, ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013). У мирний час базовий ризик за LOPA становить 0,00005–0,0001 (0,005–0,01%). Підвищення до 1% і вище вважається неприйнятним (табл. 2).

Результати дослідження.

Втома у працівників критичної інфраструктури (передусім енергетиків, ремонтних бригад, комунальників) – це стан стійкого фізичного, психоемоційного та когнітивного виснаження, який розвивається не від разової перевантаженості,



Рис. 1. Модель швейцарського сиру, яка пояснює як синдрому хронічної кумулятивної втоми у працівників призводить до зростання рівня виробничого травматизму

Таблиця 1

Визначення величини ймовірності відмов захисних шарів

Захисний шар	Опис впливу небезпечних чинників	Метод для визначення ймовірності відмови	Оцінка ймовірності відмови	Джерела
можливість відпочинку	Відсутність планування графіків, ротації, військові атаки, дефіцит кадрів	Модель Layer of Protection Analysis	0.6–0.8	[10]
фактичний відпочинок	Відсутність повноцінних вихідних, скасування норм охорони праці	Біоматематичні моделі для втоми	0.5–0.7	[7]
моніторинг втоми	Соціальний тиск хронічний стрес	Модель Human Error Assessment and Reduction Technique	0.4–0.6	[1]
моніторинг помилок	ручна праця, відсутність моніторингу	Модель Fault Tree Analysis	0.3–0.5	[11]

Таблиця 2

Шкала для визначення рівня ризику травматизму

Рівень ризику	Ймовірність травматизму	Рекомендовані дії
Прийнятний	< 0.001 (< 0.1%)	Стандартний контроль, моніторинг
Прийнятний з перевіркою	0.001–0.01 (0,1–1%)	Додаткові заходи, постійний моніторинг втоми
Неприйнятний	0.01–0.05 (1–5%)	Невідкладне зниження ризику (ротація, обмеження змін)
Критично неприйнятний	> 0.05 (> 5%)	Негайна зупинка робіт / радикальні зміни організації праці

а від багаторічної накопиченої дії стресорів без достатнього відновлення [11]. Виділяють три групи небезпечних чинників воєнні, метрологічні, психосоціальні. Їх дія проявляється на першому етапі у зниженні когнітивних функцій: погіршення концентрації, реакції та прийняття рішень – ключових для безпечної роботи з високовольтним обладнанням чи в умовах холоду. Далі фізичної слабкості, що збільшить помилки у ручній праці, наприклад, вислизання інструментів через знижену моторику. Потім до емоційного вигорання, що знизить мотивацію до дотримання правил безпеки, підвищить ймовірність ризику аварій. Це призведе до підвищення базових значень ймовірності людської помилки від 4 до 16 разів,

що розраховано за моделлю HEART. Результати розрахунку коефіцієнта зростання ймовірності відмови захисних шарів наведені в таблиці 3.

В таблиці 4 наведений розрахунок діапазону ймовірності відмови захисних шарів на основі виявленого причинно-наслідкового зв'язку між етапами розвитку втоми і кількістю помилок.

В таблиці 5 представлені результати розрахунку ризику травматизму працівників критичної інфраструктури з урахуванням зменшення надійності захисних бар'єрів. Для визначення оптимістичного сценарію брали нижній діапазон ймовірності відмови захисного бар'єру, а для песимістичного – верхній, для номінального – значення по середині.

Таблиця 3

Результати розрахунків коефіцієнту зростання ймовірності відмови захисного бар'єру від впливу умов, які збільшують помилки при виконанні виробничих завдань

Умови, які призводять до збільшення помилок	Коефіцієнт зростання ймовірності відмови захисних шарів	Обґрунтування
Дефіцит часу для виявлення та виправлення помилки	12	60-годинний тиждень, відсутність ротації
Втома / фізичний стрес	6	хронічна втома, холод, важка ручна праця
Високий емоційний стрес	4	обстріли, соціальний тиск
Екстремальні умови середовища (холод, темрява)	4	мороз, робота вночі
Низький моральний дух колективу	4	постійний тиск суспільства

Таблиця 4

Опис причинно-наслідкового зв'язку між етапами розвитку синдрому втоми і кількістю помилок

Етап розвитку синдрому	Механізм впливу на працівника	Безпосередній наслідок для безпеки	Діапазон ймовірності відмови захисного шару	Обґрунтування ймовірності відмови
Компенсаторна фаза	Збільшення помилок через переоцінку сил; робота в холоді/темряві без перерв.	Зниження уваги: неадекватна оцінка ризиків (наприклад, робота на висоті без фіксації).	0.65–0.80	Відмова перших двох шарів захисту («можливість відпочинку» 0,6–0,8 та «фактичний відпочинок» 0,5–0,7). 60-годинний тиждень, відсутність ротації та військові атаки роблять планування та відновлення неможливими (модель LOPA + дані про воєнний стан).
Фаза виснаження	Гормональний дисбаланс, зниження моторики та імунітету; відсутність відновлення після 24/7 змін.	Фізичні помилки: вислизання інструментів, падіння; когнітивні, ігнорування сигналів небезпеки.	0.50–0.70	Основна відмова шару «моніторинг втоми» (0,4–0,6). Відсутність тестів на концентрацію (PVT), медичного контролю та соціальний тиск сильно підвищують ймовірність (модель HEART).
Кумулятивний ефект	Синергія чинників (війна + холод + тиск) блокує відновлення.	Системні аварії: каскадні збої, де втома бригади призводить до масових інцидентів.	0.60–0.82	Комплексна відмова шару «моніторинг помилок» (0,3–0,5) на фоні відмови попередніх шарів. При хронічній втомі навіть наявні перевірки стають неефективними (модель Fault Tree Analysis + модель «швейцарського сиру»).

Таблиця 5

Сценарій	Величина ймовірності відмов захисних бар'єрів				Загальний ризик	Оцінка ризику	Коментар
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄			
Оптимістичний	0,6	0,5	0,4	0,3	0,036	Неприйнятний	Ризик у 360 разів вищий за ризик у мирний час; потребує негайного усунення
Номінальний	0,7	0,6	0,5	0,4	0,084	Категорично неприйнятний	Ризик понад 800 разів вищий за ризик у мирний час; хронічна втома блокує всі бар'єри
Песимістичний	0,8	0,7	0,6	0,5	0,168	Категорично неприйнятний	Ризик 1600 разів вищий за ризик у мирний час; реальна загроза масових інцидентів

Таблиця 6

Результати розрахунку ризику травматизму працівників критичної інфраструктури

Сценарій	Величина ймовірності відмов захисних бар'єрів				Загальний ризик	Оцінка ризику	Коментар
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄			
Оптимістичний	0,6	0,5	0,4	0,3	0,036	Неприйнятний	Ризик у 360 разів вищий за ризик у мирний час; потребує негайного усунення
Номінальний	0,7	0,6	0,5	0,4	0,084	Категорично неприйнятний	Ризик понад 800 разів вищий за ризик у мирний час; хронічна втома блокує всі бар'єри
Песимістичний	0,8	0,7	0,6	0,5	0,168	Категорично неприйнятний	Ризик 1600 разів вищий за ризик у мирний час; реальна загроза масових інцидентів

Отримані результати підтверджують існування прямого причинно-наслідкового зв'язку між розвитком синдрому хронічної кумулятивної втоми та зростанням рівня виробничого травматизму. У всіх трьох сценаріях загальний ризик травматизму (0.036–0.168) потрапляє в зону неприйнятного та категорично неприйнятного рівня, що показує його зростання в 360–1680 разів по відношенню до базового ризику травматизму мирного часу (0.00005–0.0001 за LOPA).

Обговорення. Отримані результати адаптованої моделі «швейцарського сиру» чітко підтверджують існування прямого причинно-наслідкового зв'язку між розвитком синдрому хронічної кумулятивної втоми та катастрофічним зростанням ризику виробничого травматизму в умовах воєнного стану. Зокрема, ймовірність відмови захисних бар'єрів збільшується в 4–16 разів залежно від поєднання воєнних, метеорологічних та психосоціальних чинників (див. табл. 3), а загальний ризик травматизму на одну критичну операцію досягає 3.6–16.8% (табл. 6), що повністю потрапляє в зону категорично неприйнятного рівня ризику за шкалою CCPS та IEC 61511. Це перевищення базового ризику мирного часу (0.00005–0.0001 за LOPA) у 360–1680 разів свідчить про системну неспроможність чинної організації праці (60-годинний

робочий тиждень, відсутність ротації та моніторингу втоми) забезпечувати прийнятний рівень безпеки на об'єктах критичної інфраструктури України у 2025–2026 рр.

Такі висновки повністю узгоджуються з міжнародними дослідженнями впливу втоми на безпеку праці. Sprajcer et al. (2022) у систематичному огляді ефективності систем управління ризиками втоми (FRMS) в авіації, транспорті та пожежній охороні встановили, що відсутність обов'язкової ротації та моніторингу сну підвищує ймовірність інцидентів і травм на 50–300 %, причому найбільший ефект спостерігається саме за умови поєднання хронічного дефіциту відпочинку з високим психоемоційним навантаженням. У нашому дослідженні коефіцієнти зростання (до 12 разів при дефіциті часу) перевищують наведені значення через додаткові воєнні стресори (обстріли, скасування норм охорони праці Законом № 2136-IX), що не були присутні в мирних умовах, розглянутих попередніми авторами.

Аналогічні результати демонструє Jo and Kim [8], які за допомогою DTW-аналізу довели, що втома працівників будівництва підвищує ризик падінь у 3–4 рази, особливо на слизьких поверхнях та в екстремальних погодних умовах. Наші розрахунки за моделлю HEART показують

ще вищий мультиплікативний ефект (коефіцієнт 4–6 за холод та фізичний стрес), оскільки в енергетичному секторі України поєднуються одночасно холод, темрява, висотні роботи та постійна загроза ракетних ударів – чинники, які суттєво посилюють відмову перших двох захисних шарів («можливість відпочинку» та «фактичний відпочинок»).

Sieber et al. (2022), досліджуючи транспортну та комунальну сфери, зазначили, що накопичення втоми підвищує ризик травм і near-misses на 50 % і наголосили на необхідності біоматематичних моделей прогнозування та обмеження тривалості змін. Наші результати за LOPA та моделлю «швейцарського сиру» доводять, що в умовах воєнного стану цей ризик зростає не на 50%, а в десятки разів, оскільки чинна нормативна база (зокрема скасування обмежень робочого часу) повністю блокує третій і четвертий шари захисту (моніторинг втоми та моніторинг помилок). Таким чином, дослідження підтверджує, що традиційні рекомендації міжнародних FRMS потребують суттєвої адаптації до реалій повномасштабної війни.

Практична значущість отриманих результатів полягає в науковому обґрунтуванні негайних організаційних змін: обов'язкової ротації персоналу, впровадження медичного скринінгу (тест PVT) та перегляду Закону № 2136-IX. Впровадження цих заходів дозволить знизити ризик до

прийняттого рівня ($< 0,1\%$) і зберегти кваліфікований персонал критичної інфраструктури – найцінніший ресурс обороноздатності держави.

Обмеження дослідження пов'язані з використанням експертних оцінок ймовірностей відмов бар'єрів (LOPA, HEART); для підвищення точності необхідна емпірична валідація на реальних об'єктах з застосуванням фітнес-трекерів та психофізіологічного моніторингу. Перспективи подальших досліджень включають розробку інтегрованої цифрової системи моніторингу втоми з урахуванням воєнних стресорів та оцінку ефективності запропонованих запобіжних заходів у польових умовах.

Висновки. Встановлено ймовірність відмови захисних бар'єрів, які зменшують ризик травматизму від втоми зростає в 4–16 разів. Загальний ризик травматизму становить 3.6–16.8 % на одну критичну операцію і перебуває в зоні категорично неприйняттого рівня ризику травматизму. Показано, що чинна організація праці (60-годинний робочий тиждень, відсутність ротації та моніторингу втоми) є основною причиною зростання травматизму в енергетичному секторі України у 2025–2026 рр. Запропоновані запобіжні заходи (обов'язкова ротація, медичний скринінг, перегляд Закону № 2136-IX) дозволять суттєво знизити ризик і зберегти найцінніший ресурс – кваліфікований персонал критичної інфраструктури.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Alexander T. M. Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) and Human Factor Analysis and Classification System (HFACS). NASA Technical Reports Server, 2017. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170010256>
2. Basner M., Mollicone D., Dinges D. F. Validity and sensitivity of a brief psychomotor vigilance test (PVT-B) to total and partial sleep deprivation. *Acta Astronautica*. 2011. Vol. 69, № 11–12. P. 949–959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.07.015>
3. Civil Aviation Safety Authority. Fatigue Risk Management System Handbook. Canberra, 2013. URL: <https://www.casa.gov.au/sites/default/files/2021-12/fatigue-risk-management-systems-handbook.pdf>
4. Civil Aviation Safety Authority. Fatigue risk management system (FRMS) handbook. Canberra, 2021. URL: <https://www.casa.gov.au/resources-and-education/publications/manuals-handbooks-and-templates/fatigue-risk-management-system-frms-handbook>
5. Federal Aviation Administration. AC 120-103A - Fatigue Risk Management Systems for Aviation Safety. U.S. Department of Transportation, 2013. URL: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_120-103a.pdf
6. Hasibuan R. P. S., Fadillah S. Human Reliability Assessment Analysis with Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) Method on Sterilizer Station at XYZ Company. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 847. P. 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012042>
7. Sprajcer M., Thomas M. J. W., Sargent C., Crowther M. E., Boivin D. B., Wong I. S., Smiley A., Dawson D. How effective are Fatigue Risk Management Systems (FRMS)? A review. *Accident Analysis and Prevention*. 2022. Vol. 165. P. 106398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106398> (doi.org in Bing)
8. Jo D., Kim H. The Influence of Fatigue, Recovery, and Environmental Factors on the Body Stability of Construction Workers. *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 11. P. 3469. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24113469>

9. Sieber W. K., Chen G. X., Krueger G. P., Lincoln J. E., Menéndez C. C., O'Connor M. B. Research gaps and needs for preventing worker fatigue in the transportation and utilities industries. *American Journal of Industrial Medicine*. 2022. Vol. 65, № 11. P. 857–866. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajim.23346>
10. Summers A. E. Introduction to layers of protection analysis. *Journal of Hazardous Materials*. 2003. Vol. 104, № 1–3. P. 163–180. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00278-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00278-2)
11. Wiegmann D. A., Wood L. J., Cohen T. N., Shappell S. A. Understanding the “Swiss Cheese Model” and its application to patient safety. *Journal of Patient Safety*. 2022. Vol. 18, № 2. P. 119–123. DOI: <https://doi.org/10.1097/PTS.0000000000000900>

REFERENCES:

1. Alexander, T. M. (2017). Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) and Human Factor Analysis and Classification System (HFACS) [Otsinka ta znyzhennia liudskykh pomylk (HEART) i systema analizu ta klasyfikatsii liudskykh faktoriv (HFACS)]. *NASA Technical Reports Server*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170010256>
2. Basner, M., Mollicone, D., & Dinges, D. F. (2011). Validity and sensitivity of a brief psychomotor vigilance test (PVT-B) to total and partial sleep deprivation [Validnist ta chutlyvist korotkoho testu psykhomotornoi plynosti (PVT-B) do povnoi ta chastkovoï depriyatsii snu]. *Acta Astronautica – Akta Astronavtyka*, 69(11–12), 949–959. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.07.015>
3. Civil Aviation Safety Authority. (2013). Fatigue Risk Management System Handbook [Posibnyk z upravlinnia ryzykom vtomy]. <https://www.casa.gov.au/sites/default/files/2021-12/fatigue-risk-management-systems-handbook.pdf>
4. Civil Aviation Safety Authority. (2021). Fatigue risk management system (FRMS) handbook [Posibnyk z systemy upravlinnia ryzykom vtomy (FRMS)]. <https://www.casa.gov.au/resources-and-education/publications/manuals-handbooks-and-templates/fatigue-risk-management-system-frms-handbook>
5. Federal Aviation Administration. (2013). AC 120-103A - Fatigue Risk Management Systems for Aviation Safety [Systemy upravlinnia ryzykom vtomy dlia aviatsiinoi bezpeky]. *U.S. Department of Transportation*. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_120-103a.pdf
6. Hasibuan, R. P. S., & Fadillah, S. (2020). Human Reliability Assessment Analysis with Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) Method on Sterilizer Station at XYZ Company [Analiz nadiinosti liudyny metodom HEART na sterylizatsiinii stantsii kompanii XYZ]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – Seriya konferentsii IOP: Materialoznavstvo ta inzheneriia*, 847, 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012042>
7. Sprajcer, M., Thomas, M. J. W., Sargent, C., Crowther, M. E., Boivin, D. B., Wong, I. S., Smiley, A., & Dawson, D. (2022). How effective are Fatigue Risk Management Systems (FRMS)? A review [Naskilky efektyvni systemy upravlinnia ryzykom vtomy (FRMS)? Ohliad]. *Accident Analysis and Prevention – Analiz ta poperedzhennia avarii*, 165, 106398. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106398>
8. Jo, D., & Kim, H. (2024). The Influence of Fatigue, Recovery, and Environmental Factors on the Body Stability of Construction Workers [Vplyv vtomy, vidnovlennia ta faktoriv seredovyscha na stabilnist tila budivelnnykiv]. *Sensors – Datchyky*, 24(11), 3469. <https://doi.org/10.3390/s24113469>
9. Sieber, W. K., Chen, G. X., Krueger, G. P., Lincoln, J. E., Menéndez, C. C., & O'Connor, M. B. (2022). Research gaps and needs for preventing worker fatigue in the transportation and utilities industries [Prohalyny ta potreby doslidzhen dlia zapobihannia vtomi pratsivnykiv u transportnii ta komunalnii sferakh]. *American Journal of Industrial Medicine – Amerykanskyy zhurnal promyslovoi medytsyny*, 65(11), 857–866. <https://doi.org/10.1002/ajim.23346>
10. Summers, A. E. (2003). Introduction to layers of protection analysis [Vstup do analizu shariv zakhystu]. *Journal of Hazardous Materials – Zhurnal nebezpechnykh materialiv*, 104(1–3), 163–180. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00278-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00278-2)
11. Wiegmann, D. A., Wood, L. J., Cohen, T. N., & Shappell, S. A. (2022). Understanding the “Swiss Cheese Model” and its application to patient safety [Rozuminnia “Modeli syroho syru” ta yii zastosuvannia do bezpeky patsientiv]. DOI: <https://doi.org/10.1097/PTS.0000000000000900>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 15.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

УДК 331.45:159.9:005.334

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-34>

КОГНІТИВНІ ВИКРИВЛЕННЯ ТА МЕНТАЛЬНІ ПАСТКИ В УПРАВЛІННІ ПРОФЕСІЙНИМИ РИЗИКАМИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ЗДОРОВ'Я ТА БЕЗПЕКОЮ ПРАЦІ

Цопа Віталій Андрійович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри менеджменту
Міжнародного інституту менеджменту
ORCID ID: 0000-0002-4811-3712

Чеберячко Сергій Іванович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;
професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-3281-7157

Володченкова Наталія Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,
декан гірничо-металургійного факультету
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-4617-7285

Луценко Іван Миколайович,

кандидат технічних наук, доцент, директор
Навчально-наукового Інституту електроенергетики;
професор кафедри електроенергетики
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-6406-2364

Осинська Вікторія Сергіївна,

магістр кафедри менеджменту
Медичного колегіуму імені Людвіка Ридиґера
Університету Миколая Коперника (Польща)
ORCID ID: 0009-0006-7277-6491

Аналіз десяти найбільш небезпечних ментальних пасток (нормалізація невідповідностей, бажане мислення через упередження підтвердження, спотворення реальності пам'яттю, ілюзія невразливості, упередження авторитету, пастка інвестицій, ілюзія очевидності, ілюзія контролю та омана учасника інцидентів, упередження статус-кво, упередження виживання) показує, що вони систематично викривляють сприйняття небезпек, небезпечних чинників і професійних ризиків на всіх рівнях управління – від операційного до стратегічного.

У роботі проведено аналіз найбільш небезпечних ментальних пасток, які викривляють сприйняття небезпек, небезпечних чинників і професійних ризиків у системах управління охороною здоров'я та безпекою праці.

У дослідженні застосовано інтердисциплінарний системно-когнітивний підхід, що поєднує теоретико-аналітичні, моделювальні та прогностичні методи.

Ментальні пастки, як передбачувані когнітивні патерни, спричиняють викривлення оцінки ризиків, ігнорування «слабких сигналів» безпеки та підвищення ймовірності розвитку аварійних і катастрофічних подій, зокрема таких як аварії шатлів «Челленджер» і «Колумбія», Deepwater Horizon, Тенеріфе, Бхопал та інші.

Найбільший вплив на викривлення сприйняття небезпек, небезпечних чинників і недооцінку професійних ризиків мають ментальні пастки, що діють довгостроково та накопичувально, зокрема: нормалізація

невідповідностей та інцидентів (зсув межі прийняттого ризику в організації), пастка інвестицій (блокування припинення небезпечних дій заради «відшкодування» вкладених ресурсів), бажане мислення через упередження підтвердження (систематичне ігнорування тривожних сигналів), ілюзія контролю та омана учасника інцидентів (хибне відчуття безпеки через відсутність інцидентів) та інші.

Наукова новизна полягає у обґрунтуванні, систематизації та ранжування за ступенем впливу на викривлення сприйняття професійних ризиків десяти найбільш небезпечних ментальних пасток саме з точки зору їхнього впливу на викривлення сприйняття небезпек, небезпечних чинників та професійних ризиків на всіх рівнях управління (від виконавця до топ-менеджменту), з акцентом на накопичувальний та синергетичний ефект.

Практична цінність полягає у можливості їх безпосереднього використання для підвищення ефективності систем управління охороною здоров'я та безпекою праці на підприємствах різних галузей.

Ключові слова: когнітивні упередження, ментальні пастки, професійні ризики, управління ризиками, охорона праці, безпека праці, системи управління безпекою, людський фактор, викривлення сприйняття ризиків, культура безпеки.

Tsopa Vitaly, Cheberyachko Serhiy, Volodchenkova Nataliia, Lutsenko Ivan, Osynska Viktoriia.
Cognitive biases and mental traps in occupational risk management within occupational health and safety management systems

The analysis of ten most critical mental traps (normalization of deviance, wishful thinking driven by confirmation bias, distortion of reality by memory, illusion of invulnerability, authority bias, sunk cost fallacy, hindsight bias, illusion of control and the participant bias in incidents, status quo bias, and survivorship bias) demonstrates that they systematically distort the perception of hazards, hazardous factors, and occupational risks at all levels of management, from operational to strategic.

The study provides an analysis of the most critical mental traps that distort the perception of hazards, hazardous factors, and occupational risks within occupational health and safety management systems.

An interdisciplinary system-cognitive approach was applied, combining theoretical-analytical, modeling, and predictive methods.

Mental traps, as predictable cognitive patterns, lead to distorted risk assessment, neglect of weak safety signals, and an increased likelihood of accident and disaster development, including events such as the Challenger and Columbia shuttle disasters, Deepwater Horizon, Tenerife, Bhopal, and others.

The greatest impact on the distortion of hazard perception and the underestimation of occupational risks is exerted by mental traps that operate over the long term and have a cumulative effect, including normalization of deviance and incidents (a shift in acceptable risk boundaries within an organization), the sunk cost fallacy (preventing the termination of hazardous actions in an attempt to recover invested resources), wishful thinking driven by confirmation bias (systematic disregard of warning signals), and the illusion of control combined with participant bias (a false sense of safety due to the absence of incidents), among others.

The scientific novelty lies in the theoretical justification, systematization, and ranking of the ten most critical mental traps according to their impact on the distortion of occupational risk perception across all levels of management (from operational staff to top management), taking into account their cumulative and synergistic effects.

The practical significance lies in the possibility of directly applying the obtained results to improve the effectiveness of occupational health and safety management systems across enterprises in various industries.

Key words: cognitive biases, mental traps, occupational risks, risk management, occupational health and safety, workplace safety, safety management systems, human factor, risk perception distortion, safety culture.

Вступ. Історія розвитку систем управління охороною здоров'я та безпекою праці (СУ ОЗіБП) – це історія поступового усвідомлення складності взаємодії людини з техногенним середовищем (машинами й механізмами) [1]. Перша епоха, яку часто називають «технічною», фокусувалася на механічній надійності людино-машинних систем. Друга епоха, «системна», принесла стандартизацію систем управління охорони здоров'я і безпеки праці (ISO 45001, OHSAS 18001), намагаючись алгоритмізувати дії персоналу щоб він виконував вимоги СУОЗіБП [2]. Проте, незважаючи на безпрецедентний рівень автоматизації та контроль, небезпечні події (інциденти, нещасні випадки, аварії, тощо) продовжують постійно

відбуватись. Виникає питання щодо визначення упущень в СУОЗіБП, які не дозволяють створити повністю безпечні умови праці [3].

Одним із напрямів, що дозволяють вирішити ці проблеми, є підхід «безпека по-іншому», який зміщує фокус безпеки виробничих процесів у бік когнітивної психології працівників і керівників. Розробники вважають, що людські когнітивні механізми, являються ідеальними для швидкого реагування на прояв небезпек, небезпечних чинників та їх ризиків, але є фатально непристосованими для статистичної оцінки складних, відкладених у часі ризиків [4]. Те, що звикли називати «людською помилкою», насправді часто є результатом нормального функціонування мозку людини, який використовує

евристики – ментальні скорочення для економії енергії і попадає таким чином в ментальні пастки, які призводять до небезпечних подій в системах управління.

У публікації [5] автори провели дослідження з моделюванням якірного ефекту (anchoring bias) під час оцінювання ризику небезпечної поведінки робітників. Використовувалися експериментально надані якорі високого/низького ризику та самоіндуковані якорі (досвід травм). Визначено, що високоризикові якорі призводять до переоцінки ризику та зниження ймовірності небезпечної поведінки; низькоризикові якорі та досвід травм – навпаки, до недооцінки ризику та зростання ймовірності порушення. Автори зазначають необхідність розширення до реальних виробничих умов (польові дослідження), врахування інших когнітивних упереджень (наприклад, confirmation bias – упередження підтвердження) та довгострокового лонгітюдного відстеження ефектів дебіасингу (debiasing – процес зниження впливу когнітивних упереджень на сприйняття інформації та прийняття рішень).

У публікації [6] автори провели систематичний огляд літературних джерел і виявили 64 когнітивні упередження з чинниками прийняття рішень у будівництві. Використовувалися тематичний та наративний аналіз для виявлення циклів зростання ризиків. Також побудовано мережу посилювальних циклів, де упередження посилюють один одного та погіршують безпеку. Найвищий вплив – на етапах ідентифікації та сприйняття небезпек, небезпечних чинників та оцінки їх ризиків. Автори підкреслюють брак емпіричних польових досліджень для верифікації моделі; необхідні лонгітюдні дослідження та розробка конкретних інструментів дебіасингу для будівельної галузі.

У публікації [7] автори на основі проведених досліджень показують наявність систематичного виникнення когнітивних упереджень під час збору доказів та інтерпретації подій; упередження призводять до переоцінки індивідуальної вини та недооцінки системних чинників. Рольовий метод виявився дієвим для виявлення упереджень у реальному часі. Автори вказують на необхідність розширення вибірки за межі будівництва, лонгітюдного вивчення ефектів тренінгів та розробки стандартизованих протоколів розслідування з вбудованим дебіасингом.

У публікації [8] автори показали, що працівники оптимістично оцінюють ризик, якщо вважають його контрольованим. Виявлено значний вплив досвіду та ілюзії контролю на недооцінку ймовірності та тяжкості наслідків небезпечних

подій. Запропоновано рекомендації щодо зменшення когнітивних упереджень через навчання.

За останні 3 роки дослідження фокусуються переважно на емпіричному підтвердженні впливу конкретних когнітивних упереджень на сприйняття ризиків та поведінку в реальних галузях (будівництво, транспорт, промисловість) [9]. Основні результати підтверджують системний характер викривлень, їх накопичувальний ефект та взаємодію з організаційними факторами. Водночас практично всі автори вказують на критичний дефіцит: брак валідованих, галузево-специфічних стратегій дебіасингу та лонгітюдних досліджень дієвості втручань. Це відкриває перспективу для подальших робіт, де акцент робиться саме на когнітивному дизайні та резилієнтних стратегіях.

Мета: визначити і провести аналіз найбільш небезпечних ментальних пасток, які викривляють сприйняття небезпек, небезпечних чинників і їх професійні ризики в системі управління охороною здоров'я та безпекою праці.

Методи та методики дослідження. У роботі застосовано інтердисциплінарний, системно-когнітивний підхід, який поєднує теоретико-аналітичні, моделювальні та прогностичні методи. Саме їх синергія дозволила виявити закономірності виникнення ментальних пасток у процесах управління професійними ризиками [10]. Цей підхід базується на інтеграції досягнень когнітивної психології, теорії систем управління охороною здоров'я та безпекою праці, що дає змогу розглядати ментальні пастки не як ізолювані помилки, а як системні небезпечні чинники, зумовлені взаємодією людського мислення з робочим середовищем. Теоретико-аналітичні методи, зокрема застосування теорії дуального процесу мислення (за Деніелом Канеманом) [11], слугували основою для ідентифікації ключових когнітивних викривлень та розробити матрицю систем мислення (рис. 1), що складається з: системи «швидкого поверхневого мислення», яка є інтуїтивною, автоматичною, емоційною та енергоефективною. Вона дозволяє досвідченому працівнику «відчувати» процес, але саме вона схильна до стереотипів та когнітивних упереджень. У критичних ситуаціях, під тиском часу, втоми чи стресу, мозок автоматично перемикається на цю систему. Системи «повільного глибокого мислення», яка є аналітичним, логічним, вимагає значних волевових зусиль і енергії. Саме ця система потрібна для керування ризиками, розслідування інцидентів та розробки запобіжних і захисних заходів. Системи «повільного поверхневого мислення», яка є інтуїтивною, автоматичною, емоційною та

енергоефективною, але є не продуктивною так, як витрачає велику кількість часу. Вона дозволяє досвідченому оператору «відчувати» процес, але саме вона схильна до стереотипів та упереджень. У складних небезпечних ситуаціях, під тиском нових небезпек, небезпечних чинників приводить до неприйнятних ризиків. Системи «швидкого глибокого мислення», яка є аналітичним, логічним, вимагає значних вольових зусиль і розумової енергії. Саме ця система потрібна для реагування на надзвичайні ситуації. У надзвичайних ситуаціях, під тиском часу та стресу, мозок повинен бути натренований до швидкості аналізу і прийняття рішень.

Методи моделювання були використані для візуалізації та структуризації цих ментальних пасток, зокрема через створення матриці систем мислення (швидке поверхнєве, повільне глибоке тощо) та циклів зростання професійного ризику, що ілюструють динаміку переходу від нормальної поведінки до небезпечних подій [12].

Прогностичні методи, інтегровані в підхід, орієнтовані на розробку заходів протидії, таких як «хронічне занепокоєння», що дозволяють не тільки діагностувати наявні ризики, але й передбачати їх еволюцію і розвиток у складних системах. Синергія цих методів підкреслює необхідність переходу від традиційних інженерних підходів до когнітивно-орієнтованих підходів мислення, де акцент робиться на адаптації процесів СУОЗІБП до природних особливостей людського мислення. У підсумку, цей інтердисциплінарний аналіз не

лише розкриває вразливості сучасних СУОЗІБП, але й пропонує підхід для їх удосконалення, сприяючи формуванню культури безпеки, яка враховує когнітивні упередження як невід'ємну частину людського чинника в керуванні ризиками [13].

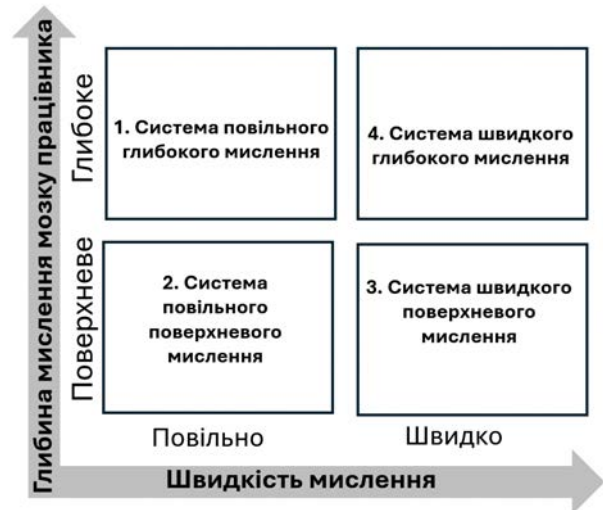


Рис. 1. Матриця систем мислення

Результати та дискусії. В таблиці 1 наведений опис ментальних пасток, які викривляють сприйняття небезпек, небезпечних чинників і тим самим збільшують професійний ризик.

Приклади дії когнітивних пасток, які призвели до катастроф через помилки в оцінюванні ризиків наведені в таблиці 2.

Таблиця 1

Опис когнітивних пасток та їх вплив на СУОЗІБП

	Метальні пастки	Опис помилок при визначенні рівня ризиків, які спровоковані когнітивними пастками	Небезпеки та небезпечні чинники від когнітивних пасток
1	Нормалізація невідповідностей і інцидентів	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через відсутність наслідків від кожного порушення правил безпеки, що поступово перетворює відхилення на прийнятну норму, ігноруючи накопичення потенційних загроз (наприклад, ігнорування хибних сигналів датчиків або систематичні порушення вимог процедур).	Ігнорування дрібних сигналів небезпеки (наприклад, хибні спрацювання датчиків, порушення процедур); нормалізація ризикованої поведінки (економія часу за рахунок безпеки).
2	Бажане мислення через упередження підтвердження	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через пошук та інтерпретацію інформації виключно на підтвердження існуючих переконань, ігноруючи або знецінюючи суперечливі дані, що спотворює об'єктивну оцінку небезпек (наприклад, упереджене тлумачення результатів тестів).	Неправильна інтерпретація тестів (наприклад, ігнорування тривожних сигналів під час перевірки); упереджене розслідування аварій (фокус на «людській помилці»).
3	Спотворення реальності пам'яттю	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через розрахунок ймовірності на основі одиничних яскравих прикладів (емоційно насичених спогадів чи медійних подій), а не на основі статистичних даних, що призводить до ірраціонального розподілу ресурсів на переоцінені ризики	Ірраціональний розподіл ресурсів (переоцінка яскравих ризиків, як пожежі, недооцінка прихованих, як токсичні викиди); нехтування повсякденними загрозами (падіння з висоти).

Продовження таблиці 1

	Метальні пастки	Опис помилок при визначенні рівня ризиків, які спровоковані когнітивними пастками	Небезпеки та небезпечні чинники від когнітивних пасток
4	Ілюзія невразливості	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через перебільшення своїх розумових здібностей та контролю над ситуацією, а також віру в меншу ймовірність і тяжкість наслідків небезпечних подій для себе чи своєї групи порівняно з іншими, що спричиняє недооцінку реальних загроз (наприклад, ігнорування засобів захисту досвідченими працівниками).	Недооцінка ризиків досвідченими працівниками («Я робив це тисячу разів»); ігнорування засобів захисту (наприклад, страхувальні пояси).
5	Упередження авторитету	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через підкорення авторитетній особі (керівнику чи експерту), навіть якщо її рішення суперечить очевидним фактам, досвіду чи власному судженню, що блокує критичний аналіз і сприяє «культурі мовчання» в організації.	«Культура мовчання» (ігнорування помилок керівництва); відсутність втручання в небезпечні дії (наприклад, в авіації).
6	Пастка інвестицій	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через небажання відмовитись від небезпечних проєктів (дій, рішень), у які вже вкладені значні ресурси (час, гроші, зусилля), ігноруючи майбутні витрати та загрози, аби «відіграти» минулі інвестиції (наприклад, продовження робіт попри виявлені небезпеки та небезпечні чинники).	Економія на безпеці заради «відіграшу» витрат (наприклад, використання застарілих систем); ігнорування дефектів для завершення робіт.
7	Ілюзія очевидності	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через сприйняття подій як передбачуваних і очевидних після їхнього настання, що упереджує розслідування (фокус на «як можна було не помітити?»), ігноруючи невизначеність у момент прийняття рішень і призводячи до недієвих рекомендацій.	Упереджене розслідування (звинувачення в «неуважності»); недієві рекомендації («бути уважнішим»).
8	Ілюзія контролю та омана учасника інцидентів	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через переоцінку можливостей контролю над випадковими подіями та хибну віру в зменшення ймовірності після інцидентів (наприклад, «снаряд двічі не падає в одну воронку»), що створює ілюзію безпеки та накопичує приховані небезпеки.	Хибне відчуття безпеки через відсутність інцидентів; плутанина планів з реальністю
9	Упередження статус-кво	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через емоційну перевагу поточного стану речей та опір змінам, що блокує впровадження нових, безпечніших процесів чи технологій, зберігаючи застарілі практики з високими ризиками (наприклад, відмова від цифровізації систем безпеки).	Опір новим технологіям безпеки (наприклад, електронним системам); збереження застарілих правил.
10	Упередження виживання	Призводить до помилок в оцінюванні ризиків через вибірковість небезпек і небезпечних чинників, що продиктовано попереднім досвідом виживання (фокус на «виживших» прикладах, ігнорування «невиживших» прикладів), що підриває об'єктивність і сприяє поширенню міфів про безпеку (наприклад, історії ветеранів про відсутність ЗІЗ багато років назад).	Ігнорування прихованих інцидентів (near miss); поширення міфів («Ми (ветерани) в юності не носили каски і вижили»).

Аналіз представленої таблиці 2 демонструє, що металеві пастки є системними чинниками в СУОЗіБП, які суттєво впливають на зростання ризиків в складних техногенних системах, перетворюючи потенційні вразливості на катастрофічні події. У кожному з розглянутих випадків – від катастроф космічних шатлів «Челленджер»

і «Колумбія» до промислової аварії на платформі Deepwater Horizon, трагедії в Бхопалі та авіакатастрофи на Тенеріфе (1977) – технічні й організаційні причини доповнювалися ментальними викривленнями, зокрема такими як нормалізація невідповідностей, бажане мислення та упередження авторитету [14...18]. Ці

Таблиця 2

Аналіз впливу когнітивних пасток, які стали причинами катастроф

Назва катастрофи та втрати	Причини катастрофи	Опис когнітивних пасток, які збільшили ризик	Заходи протидії
Катастрофа шатла «Челленджер» (1986) Втрати: загибель 7 членів екіпажу, втрата космічного шатла, значні фінансові збитки, зниження довіри до космічної програми NASA	Технічна – прогорання ущільнювального кільця через низьку температуру навколишнього середовища; Організаційна – ігнорування попереджень інженерів, які контролювали роботу цього вузла.	Нормалізація невідповідностей ерозія сприймалася як допустимий ризик через успішні попередні місії, що призвело до поступового зсуву «безпечної» межі та ігнорування сигналів небезпеки.	Хронічне занепокоєння БЗР (постійні питання «Що ми пропустили?»); аудит успішних операцій; зовнішня ротація (залучення свіжого погляду).
Катастрофа шатла «Колумбія» (2003) Втрати: загибель 7 членів екіпажу, повна втрата шатлу, призупинення польотів програми Space Shuttle, зниження довіри	Технічна – пошкодження теплозахисного покриття крила від відриву піни.	Нормалізація невідповідностей відрив теплоізоляційної піни став звичним явищем, інтерпретованим як безпечний, через відсутність наслідків у минулих польотах, що призвело до недооцінки ризику.	Хронічне занепокоєння БЗР; аудит успішних операцій; зовнішня ротація.
Катастрофа Deepwater Horizon (2010) Втрати:	Технічна – прорив метану через неякісне цементування; Механічна – відмова превентора; управлінська: ігнорування негативних тестів.	Бажане мислення через упередження підтвердження інтерпретація неоднозначних результатів тестів як успішних (винайдення «ефекту міхура»), ігнорування суперечливих даних тесту для продовження робіт.	Метод «Адвоката диявола»; сліпий аналіз; техніка спростування гіпотез.
Авіакатастрофа на Тенеріфе (1977) Втрати: загибель 11 працівників та поранення персоналу, масштабне забруднення акваторії Мексиканської затоки, значні фінансові збитки, пов'язані з ліквідацією наслідків аварії, компенсаційними виплатами та штрафами	Збій зв'язку в тумані: літак KLM почав зліт без дозволу, зіткнувшись з Pan Am; людський чинник: ієрархія в екіпажі.	Упередження авторитету другий пілот не наважився рішуче заперечити капітану через страх перед авторитетом, що призвело до ігнорування помилки та виникнення катастрофи.	Право на зупинку роботи; деперсоналізація ідей; навчання «Assertiveness».
Бхопальська катастрофа (1984) Втрати: масова загибель населення (за різними оцінками від кількох тисяч до понад 15 тис. осіб) та сотні тисяч постраждалих, довгострокові наслідки для здоров'я населення, значні фінансові витрати, зниження довіри до хімічної промисловості	Хімічна – реакція води з метилізоціанатом; системна: вимкнені системи безпеки через економію коштів.	Пастка інвестицій небажання утилізувати токсичні запаси на збитковому заводі, аби «відіграти» інвестиції, що призвело до економії на безпеці та масового викиду отруйного газу.	Жорсткі критерії переривання; зовнішня оцінка.
Ефект 11 вересня 2001 року (не безпосередня катастрофа, але наслідок її) Втрати: зміна поведінкових моделей через підвищений страх авіаперельотів, нераціональний перерозподіл ризиків, епряме зростання смертності внаслідок переходу населення від авіаперельотів до автомобільного транспорту.	Зростання смертності на дорогах через страх авіаперельотів після терактів.	Спотворення реальності пам'яттю (евристика доступності) переоцінка ризику польотів через яскраві медійні образи, недооцінка реальних статистичних ризиків водіння.	Опора на дані; штучна візуалізація ризиків; декуплінг.

пастки не є ізольованими помилками, а проявляються як передбачувані небезпечні чинники людського мислення, що ігнорують «слабкі сигнали» небезпеки, сприяють ескалації ризиків і призводять до значних втрат.

В таблиці 3 наведений аналіз впливу когнітивних пасток на керування ризиків. Ранг визначався у відповідності до ранжування ментальних пасток на основі частоти згадування в реальних катастрофах; здатності пастки систематично накопичувати ризик протягом тривалого часу; масштабності наслідків, коли пастка спрацьовує; впливу на рішення на всіх рівнях управління (лінійний, середній, вищий)

Найвищий вплив мають ментальні пастки, які діють довгостроково і накопичувально (№1, №2, №6), впливають на прийняття рішень на високому рівні (№2, №3, №5) або блокують реакцію на сигнали небезпеки (№1, №3, №4).

Когнітивні упередження керівників і працівників в СУОЗіБП рідко діють поодиночі. У великих

катастрофах вони накладаються одне на одне, створюючи «Ефект Лоллапалуза» (Lollapalooza Effect) – експоненційне посилення упереджень і наслідків (табл. 4). Приклад сценарію появи інцидентів через призму ментальних пасток. Керівництво під впливом ментальної пастки «Бажане мислення» затверджує нереалістичний і небезпечний графік робіт. Інженери, помічаючи небезпеки, небезпечні чинники і їх неприйнятний ризик, мовчать через ментальну пастку «Упередження авторитету». Часті збої без наслідків ігноруються через ментальну пастку «Нормалізація невідповідностей і інцидентів». Коли проблеми накопичуються, проект не зупиняють через ментальну пастку «Інвестицій». Негативну інформацію тестів, аудитів, розслідування, тощо інтерпретуються позитивно через ментальну пастку «Бажане мислення через упередження». У результаті дії ментальної пастки «ілюзія контролю» формується хибне уявлення про безпеку. Після настання катастрофи комісія

Таблиця 3

Аналіз впливу когнітивних пасток на керування професійними ризиками

Ранг	Ментальна пастка	Рівень впливу на керування ризиками	Чому саме ця пастка має один з найбільших впливів
1	Нормалізація невідповідностей і інцидентів	Дуже високий	Поступово зсуває межу прийнятного ризику в сторону неприйнятного ризику в усій організації, робить відхилення нормою, блокує реакцію на слабкі сигнали. Працює довгостроково і на всіх рівнях.
2	Пастка інвестицій (омана незворотних витрат)	Дуже високий	Змушує продовжувати небезпечні дії/проекти заради «відіграшу» вже вкладених ресурсів, ігноруючи об'єктивні дані про ризик. Часто блокує зупинку на останньому етапі.
3	Бажане мислення через упередження підтвердження	Високий	Систематично фільтрує інформацію, ігнорує тривожні сигнали небезпек і небезпечних чинників, дозволяє «бачити» безпеку там, де її немає. Особливо небезпечно під час тестів, аудитів і розслідувань.
4	Ілюзія контролю	Високий	Створює хибне відчуття безпеки через відсутність інцидентів або через гасла «Zero Harm». Призводить до недооцінки накопичених прихованих небезпек та небезпечних чинників, та їх ризиків.
5	Упередження авторитету	Високий	Блокує критичний зворотний зв'язок від підлеглих, дозволяє авторитетній особі (керівнику) приймати ризиковані та помилкові рішення без урахування думок підлеглих. Дуже небезпечно в ієрархічних структурах.
6	Упередження статус-кво	Середньо-високий	Гальмує впровадження нових безпечніших технологій і процедур, зберігає застарілі та небезпечні практики. Довгостроковий накопичувальний ефект.
7	Ілюзія невразливості (упередження оптимізму)	Середньо-високий	Досвідчені працівники та керівники недооцінюють ризик для себе. Часто поєднується з нормалізацією.
8	Спотворення реальності пам'яттю (евристика доступності)	Середній	Спотворює пріоритети: переоцінка яскравих небезпек, небезпечних чинників і їх ризиків і недооцінка «тихих» небезпек, небезпечних чинників і їх ризиків. Впливає на розподіл ресурсів щодо запобіжних і захисних заходів.
9	Упередження виживання	Середній	Підриває культуру безпеки через міфи «ми так завжди робили і нічого». Ігнорує приховані near miss та профзахворювання.
10	Ілюзія очевидності (упередження заднього числа)	Низький – середній	Найбільше шкодить після інциденту: спотворює розслідування, призводить до недовірливих рекомендацій («будьте уважнішими»). Менше впливає на попередження.

з розслідування під впливом ментальної пастки «ілюзія очевидності» схильна звинувачувати окремого працівника, оскільки це є когнітивно простішим, ніж виявлення системних причин події. Як наслідок, системні чинники часто залишаються поза увагою.

Причиною цього є особливості функціонування людського мозку, який прагне мінімізувати когнітивні зусилля. З позицій нейробіології та еволюційної психології мозок людини функціонує за принципом енергозаощадження, надаючи перевагу спрощеним когнітивним стратегіям. Це зумовлює системне використання евристик і, відповідно, виникнення когнітивних упереджень, що має критичне значення для процесів прийняття рішень та управління професійними ризиками в системах ОЗІБП.

Аналіз десяти ключових когнітивних пасток демонструє, що традиційні методи управління безпекою: інженерні, організаційні (процедури, навчання, тощо) та ЗІЗ, є необхідними, але недостатніми. Вони не враховують «когнітивні упередження» працівників їх упереджене мислення в питаннях систему ОЗІБП. Зокрема, когнітивна пастка – *нормалізація невідповідностей і інцидентів* – це поступовий процес, за якого технічні або процедурні порушення вимог безпеки стають прийнятною нормою в організації (рис. 2) через відсутність негативних наслідків протягом тривалого часу [19].

Для побудови дійсно стійких систем управління системи ОЗІБП необхідно інтегрувати знання про когнітивні упередження працівників в самі процеси організації. Так, когнітивна пастка – бажане мислення через упередження підтвердження – це тенденція шукати, інтерпретувати та запам'ятовувати інформацію таким чином, щоб вона підтверджувала вже існуючі переконання, при цьому ігноруючи або знецінюючи дані, що їм суперечать [20]. Це упередження є особливо руйнівним під час аудитів та розслідування інцидентів, нещасних випадків, аварій,

тощо. Якщо той хто проводить аудит чи розслідування на початку формує гіпотезу (наприклад, «винна неухважність оператора»), він несвідомо фільтруватиме докази. Пропущений запис у журналі стане «доказом» недбалості, а незручне розташування приладів буде проігноровано. В оцінці ризиків команди часто шукають дані, що підтверджують безпеку запланованого проєкту, ігноруючи «слабкі сигнали» небезпек і небезпечних чинників про потенційні проблеми, особливо якщо проєкт є фінансово привабливим.

Визнання вразливості СУОЗІБП є першим кроком до усвідомлення того, що навіть найкращі експерти схильні до помилок, зумовлених ментальними пастками. Врахування цих пасток та протидія їх впливу мають стати невід'ємною складовою корпоративної культури безпеки. Наприклад, когнітивна пастка – спотворення реальності пам'яттю через евристику доступності – призводить до помилок в оцінюванні ризиків через схильність спиратися на легко відтворювані приклади подібних подій. Легкість пригадування залежить не від статистичної частоти, а від емоційної насиченості, новизни та медійного висвітлення подій. У системах управління СУОЗІБП це призводить до ірраціонального розподілу ресурсів на запобіжні та захисні заходи [21]. Якщо в галузі сталася велика пожежа, всі підприємства кидають бюджети на пожежну безпеку, навіть якщо їхній головний ризик – токсичні викиди чи падіння з висоти. Яскрава картинка пожежі в новинах робить цей ризик «доступним» для мозку. Також за схожим принципом діє когнітивна пастка – ілюзія невразливості, яка через упередження оптимізму призводить до зниження ймовірності виникнення інциденту порівняно з іншими. Це не просто психологічна установка, а біологічно зумовлений механізм функціонування людського мозку, який сприяє підтриманню психічного здоров'я, проте в небезпечних умовах може призводити до фатальних наслідків. На рівні безпеки

Таблиця 4

Взаємодії та синергії упереджень ментальних пасток

Можлива взаємодія ментальних пасток	Взаємодія	Наслідок для системи управління ОЗІБП
«Ілюзія невразливості» + «Ілюзію контролю».	Посилюють одне одного, створюючи сліпоту до небезпек, небезпечних чинників і їх ризиків.	«Титанік-ефект»: віра в неможливість катастрофи.
«Нормалізація невідповідностей і інцидентів» + «Упередження статус-кво»	Блокують зміни та адаптацію до нових небезпек, небезпечних чинників і їх ризиків.	Системна стагнація та накопичення прихованих небезпек, небезпечних чинників і їх ризиків.
Упередження авторитету + Бажане мислення через упередження	Альтернативні думки відкидаються.	Групове мислення, фатальні стратегічні помилки.
Упередження виживання + Ілюзія очевидності	Викривляють пріоритети після інцидентів.	Реактивне управління «гасіння пожеж»

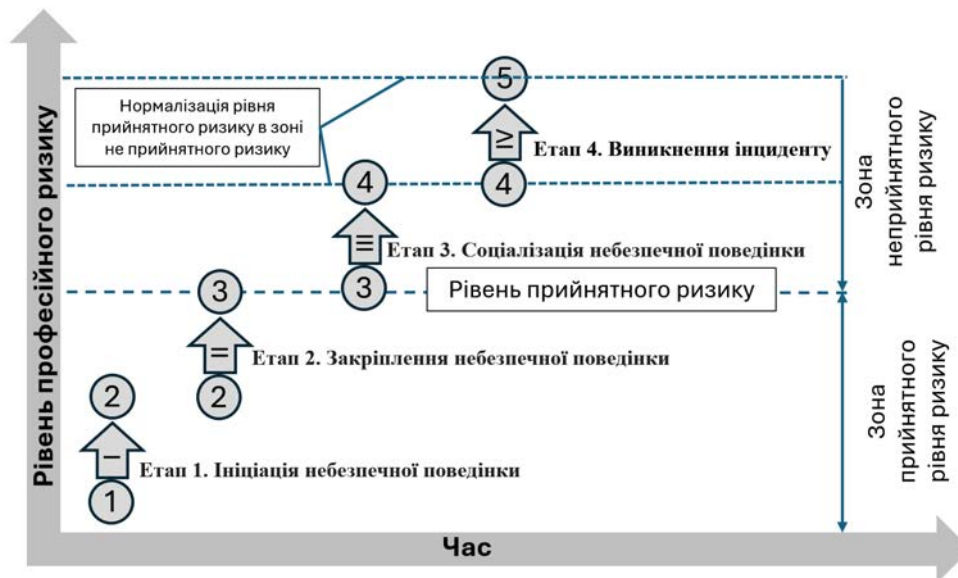


Рис. 2. Процес зростання рівня ризику при його нормалізації в часі

працівника це проявляється в тому, що досвідчені працівники часто переоцінюють власні можливості та недооцінюють ризики, сприймаючи свій досвід як захисний фактор. Типовим є переконання у безпечності дій через їх багаторазове виконання в минулому. Дослідження свідчать, що працівники схильні оцінювати ризики для інших як вищі, ніж для себе. На рівні організації виконання робіт це проявляється в систематичній недооцінці часу та ресурсів, необхідних для безпечного виконання завдань. Менеджери часто ігнорують імовірність затримок, пов'язаних із зовнішніми та внутрішніми чинниками, зокрема погодними умовами, технічними відмовами чи інцидентами [22].

Замість того, щоб боротися з людською природою, треба використовувати її. Так різноманітність думок є найкращим захистом від групових упереджень. Навчання мета-навичкам формує здатність розпізнавати власні когнітивні упередження, зокрема упередження підтвердження та втому від прийняття рішень, що є критично важливою компетенцією у сфері ОЗіБП. Особливо це актуально для зменшення впливу когнітивної пастки «ілюзія очевидності», яка зумовлює схильність сприймати події, що вже відбулися, як передбачувані. Різноманітність думок і відповідне навчання також сприяють зменшенню впливу «ілюзії контролю», оскільки дозволяють уникати переоцінки власних можливостей впливати на випадкові інциденти [23].

Традиційні методи управління ризиками (інженерні бар'єри, організаційні процедури,

засоби індивідуального захисту) є необхідними, але недостатніми, оскільки не враховують когнітивні викривлення, зумовлені дуальним процесом мислення (швидке поверхневе порівняно з повільним глибоким). На всіх рівнях СУОЗіБП ці пастки посилюють «людський чинник», перетворюючи нормальні евристичні джерела помилок, як-от ірраціональний розподіл ресурсів (евристика доступності) чи блокування змін (упередження статус-кво), що вимагає інтеграції психологічних знань для корекції сприйняття ризиків.

В СУОЗіБП часто аналізують лише ті інциденти, про які було звітано, але тисячі небезпечних ситуацій, де працівники просто злякалися і промовчали, або де наслідки були відкладеними (профзахворювання), залишаються невидимими для СУОЗіБП. Звідси виникає парадокс керування професійними ризиками, який полягає в тому, що вимагаючи від працівників постійного перебування в режимі «повільного глибокого мислення», забуваємо, що фізіологія штовхає їх до «повільного поверхневого мислення». Когнітивні пастки при керуванні професійними ризиками – це не випадкові збої, а системні, передбачувані патерни перемикання між цими системами. Безпека майбутнього – це не відсутність аварій (що часто є ілюзією), а наявність спроможності розпізнавати, адаптуватися та відновлюватися після помилок, невідповідностей та інцидентів, які неминуче виникатимуть у складному світі організацій [24].

Для подолання викривлень сприйняття небезпек і ризиків рекомендовано впроваджувати когнітивно орієнтовані запобіжні та захисні заходи на всіх рівнях: визнання вразливості систем (хронічне занепокоєння), розробка процесів з урахуванням людської фізіології (адаптація до швидкого глибокого мислення), диверсифікація команд для протидії груповим упередженням та навчання мета-навичкам (розпізнавання власних когнітивних пасток) [25]. Це забезпечить перехід від реактивного до прогностичного управління, де безпека базується на резиліентності – здатності розпізнавати, адаптуватися та відновлюватися після інцидентів у сучасному складному техногенному середовищі.

Висновки. Проведене дослідження показало, що ментальні пастки є системними чинниками, які суттєво викривляють сприйняття небезпек, небезпечних чинників і пов'язаних із ними професійних ризиків на всіх рівнях системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вони проявляються як передбачувані

когнітивні патерни людського мислення, що призводять до недооцінки загроз, ігнорування «слабких сигналів» небезпеки та накопичення ризиків, які можуть трансформуватися в аварії та катастрофи (зокрема «Челленджер», «Колумбія», Deepwater Horizon, Тенеріфе, Бхопал тощо).

Найбільший вплив мають ментальні пастки, що діють довгостроково та накопичувально, зокрема нормалізація невідповідностей і інцидентів, пастка інвестицій, упередження підтвердження, а також ілюзія контролю та омана учасника інцидентів. Саме ці пастки зумовлюють системне ігнорування небезпек, блокування своєчасних управлінських рішень і формування хибного відчуття безпеки в організаціях.

Отримані результати підтверджують необхідність інтеграції когнітивно орієнтованих підходів у системи управління ризиками та розвитку культури безпеки, що враховує особливості людського мислення як ключового чинника виникнення ризиків.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Kerin T. The impact of cognitive bias in safety. *Hazards 31 Symposium Proceedings*. Institution of Chemical Engineers. 2024. URL: <https://www.icheme.org/media/27722/hazards-31-paper-26-kerin.pdf>.
2. Tunnel construction workers' cognitive biases and unsafe behaviors: The mediating effects of risk perceptions / J. Li et al. *Advances in Civil Engineering*. 2020. Article 8873113. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8873113>.
3. Why do workers generate biased risk perceptions? An analysis of anchoring effects and influential factors in workers' assessment of unsafe behavior / R. Liu et al. *Safety and Health at Work*. 2024. Vol. 15, No. 3. P. 345–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.03.006>.
4. Misiurek B., Misiurek M. Analysis of cognitive biases in construction health and safety in New Zealand. *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 7. P. 1033. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15071033>.
5. Vaughan D. The Challenger launch decision: Risky technology, culture, and deviance at NASA. Enlarged ed. University of Chicago Press, 2016. 520 p.
6. Price M. R., Williams T. C. When doing wrong feels so right: Normalization of deviance. *Journal of Patient Safety*. 2018. Vol. 14, No. 1. P. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1097/PTS.000000000000155>.
7. Flin R., O'Connor P., Crichton M. Safety at the sharp end: A guide to non-technical skills. CRC Press, 2008. 330 p.
8. Workplace safety: A meta-analysis of the roles of person and situation factors / M. S. Christian et al. *Journal of Applied Psychology*. 2009. Vol. 94, No. 5. P. 1103–1127. DOI: <https://doi.org/10.1037/a0016172>.
9. Tversky A., Kahneman D. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*. 1974. Vol. 185, No. 4157. P. 1124–1131. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>.
10. Haslbeck A., Hoermann H.-J. Flying the Needles: Flight Deck Automation Erodes Fine-Motor Flying Skills Among Airline Pilots. *Human Factors*. 2016. Vol. 58, No. 4. P. 533–545. DOI: <https://doi.org/10.1177/0018720815622292>.
11. Dekker S. The field guide to understanding 'human error'. 3rd ed. CRC Press, 2014. 240 p.
12. Reason J. Managing the risks of organizational accidents. Ashgate, 1997. 272 p.
13. Leveson N. Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety. MIT Press, 2011. 534 p.
14. Resilience engineering: Current status of the research and future challenges / R. Patriarca et al. *Safety Science*. 2018. Vol. 102. P. 79–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.005>.
15. Чорнобиль. Документи Оперативної групи ЦК КПУ (1986–1988) / упоряд.: О. В. Бажан та ін.; відп. ред. В. А. Смолій. Київ: Інститут історії України, 2017. 830 с. URL: <http://resource.history.org.ua/item/0013084>.

16. Executive Order - United States Policy on Pre- and Post-Strike Measures to Address Civilian Casualties in U.S. Operations Involving the Use of Force. 2016. URL: <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2016/07/01/fact-sheet-executive-order-us-policy-pre-post-strike-measures-address>.
17. Євроатлантичний центр координації реагування на катастрофи : Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Євроатлантичний_координаційний_центр_реагування_на_природні_лиха_та_катастрофи.
18. Витрикуш Н. М., Дацько О. С. та ін. Особливості організації цивільного захисту країн Європи. *Державне управління у сфері цивільного захисту: наука, освіта, практика* : зб. матеріалів міжнар. наук.-практ. конф. Харків, 2018. С. 202–204.
19. Hollnagel E. Safety-I and Safety-II: The past and future of safety management. Ashgate, 2014. 192 p.
20. Behind human error / D. D. Woods et al. 2nd ed. CRC Press, 2010. 268 p.
21. Shappell S., Wiegmann D. The human factors analysis and classification system–HFACS. *Handbook of human factors in air transportation systems*. CRC Press, 2019. P. 123–140. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351653152-8>.
22. Salmon P. M., Read G. J. M., Stevens N. J. Sociotechnical system safety: Hierarchical control versus mindfulness. *Safety Science*. 2017. Vol. 99. P. 142–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.05.021>.
23. Cognitive work analysis: Applications, extensions and future directions / P. Waterson et al. *Ergonomics*. 2021. Vol. 64, No. 5. P. 577–593. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1899290>.
24. Аналіз причин та особливості керування ризиками у надзвичайних ситуаціях / В. Цопа та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 174–185. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351112>.
25. Азаров С. І., Задунай О. С. Аналіз природних катастроф та їх впливу на довкілля. *Екологічна безпека та природокористування*. 2019. № 4 (32). С. 78–91.

REFERENCES:

1. Kerin, T. (2024). *The impact of cognitive bias in safety*. Hazards 31 Symposium Proceedings. Institution of Chemical Engineers. <https://www.icheme.org/media/27722/hazards-31-paper-26-kerin.pdf>
2. Li, J., Li, H., Wang, H., Uddin, S., Karim, M. R., & Chen, Z. (2020). Tunnel construction workers' cognitive biases and unsafe behaviors: The mediating effects of risk perceptions. *Advances in Civil Engineering, 2020*, Article 8873113. <https://doi.org/10.1155/2020/8873113>
3. Liu, R., Liu, H.-C., Shi, H., & Gu, X. (2024). Why do workers generate biased risk perceptions? An analysis of anchoring effects and influential factors in workers' assessment of unsafe behavior. *Safety and Health at Work, 15*(3), 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.03.006>
4. Misiurek, B., & Misiurek, M. (2025). Analysis of cognitive biases in construction health and safety in New Zealand. *Buildings, 15*(7), 1033. <https://doi.org/10.3390/buildings15071033>
5. Vaughan, D. (2016). *The Challenger launch decision: Risky technology, culture, and deviance at NASA* (Enlarged ed.). University of Chicago Press. (Original work published 1996)
6. Price, M. R., & Williams, T. C. (2018). When doing wrong feels so right: Normalization of deviance. *Journal of Patient Safety, 14*(1), 1–2. <https://doi.org/10.1097/PTS.0000000000000155>
7. Flin, R., O'Connor, P., & Crichton, M. (2008). *Safety at the sharp end: A guide to non-technical skills*. CRC Press.
8. Christian, M. S., Bradley, J. C., Wallace, J. C., & Burke, M. J. (2009). Workplace safety: A meta-analysis of the roles of person and situation factors. *Journal of Applied Psychology, 94*(5), 1103–1127. <https://doi.org/10.1037/a0016172>
9. Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science, 185*(4157), 1124–1131. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>
10. Haslbeck, A., & Hoermann, H.-J. (2016). Flying the needles: Flight deck automation erodes fine-motor flying skills among airline pilots. *Human Factors, 58*(4), 533–545. <https://doi.org/10.1177/0018720815622292>
11. Dekker, S. (2014). *The field guide to understanding 'human error'* (3rd ed.). CRC Press.
12. Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate.
13. Leveson, N. (2011). *Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety*. MIT Press.
14. Patriarca, R., Bergström, J., Gravio, G. D., & Constantino, F. (2018). Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. *Safety Science, 102*, 79–100. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.005>
15. Bazhan, O. V., Bazhan, O. H., Boriak, H. V., & Vlasenko, S. I. (Eds.). (2017). *Chornobyl. Dokumenty Operativnoi hrupy Tsk KPU (1986–1988)* [Chernobyl. Documents of the Operative Group of the Central Committee of the CPU (1986–1988)]. Instytut istorii Ukrainy. <http://resource.history.org.ua/item/0013084>

16. Obama White House. (2016, July 1). *Executive order - United States policy on pre- and post-strike measures to address civilian casualties in U.S. operations involving the use of force*. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2016/07/01/fact-sheet-executive-order-us-policy-pre-post-strike-measures-address>
17. Wikipedia. (n.d.). *Yevroatlantychnyi tsentr koordynatsii reahuvannia na katastrofy* [Euro-Atlantic Disaster Response Coordination Centre]. Retrieved April 28, 2026, from https://uk.wikipedia.org/wiki/Євроатлантичний_координаційний_центр_реагування_на_природні_лиха_та_катастрофи
18. Vytrykush, N. M., & Datsko, O. S. (2018). Osoblyvosti orhanizatsii tsyvilnoho zakhystu krain Yevropy [Features of the organization of civil protection in European countries]. In *Derzhavne upravlinnia u sferi tsyvilnoho zakhystu: nauka, osvita, praktyka* (pp. 202–204). Kharkiv.
19. Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and Safety-II: The past and future of safety management*. Ashgate.
20. Woods, D. D., Dekker, S., Cook, R., Johannesen, L., & Sarter, N. (2010). *Behind human error* (2nd ed.). CRC Press.
21. Shappell, S., & Wiegmann, D. (2019). The human factors analysis and classification system–HFACS. In *Handbook of human factors in air transportation systems* (pp. 123–140). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351653152-8>
22. Salmon, P. M., Read, G. J. M., & Stevens, N. J. (2017). Sociotechnical system safety: Hierarchical control versus mindfulness. *Safety Science*, 99, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.05.021>
23. Waterson, P., Jenkins, D. P., Salmon, P. M., & Bedny, G. (2021). Cognitive work analysis: Applications, extensions and future directions. *Ergonomics*, 64(5), 577–593. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1899290>
24. Tsopa, V., Cheberianko, S., Deriuhin, O., & Sharovatova, O. (2025). Analiz prychyn ta osoblyvosti keruvannia ryzykamy u nadzvychainykh sytuatsiiakh [Analysis of causes and features of risk management in emergencies]. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, (52), 174–185. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351112>
25. Azarov, S. I., & Zadunai, O. S. (2019). Analiz pryrodnykh katastrof ta yikh vplyvu na dovkillia [Analysis of natural disasters and their impact on the environment]. *Environmental Safety and Natural Resources*, 4(32), 78–91.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

НОТАТКИ

Наукове видання

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКИ

Серія: Технічні науки

№ 7, 2026

Коректура • Ірина Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Наталія Кузнєцова

Дата розміщення онлайн: 30.05.2026. Дата друку: 08.06.2026.
Формат 60x84/8. Гарнітура Arimo. Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 33,95. Замов. № 0526/502. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +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.