

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКИ

Серія: Технічні науки

№ 6, 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 № 5 від 26.02.2026)

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 НАН 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»

Савченко Ю. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Університет митної справи та фінансів

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

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

Kalisz Dorota – PhD, доцент, професор, Гірничо-металургійна академія ім. Станіслава Сташиця, Польща

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. № 6. 280 с.

ISSN 3041-2080 (print)

ISSN 3041-2099 (online)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026

ЗМІСТ

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Олейнікова Ірина Веніамінівна, Цвєркунова Анастасія Миколаївна, Хоперський Сергій Васильович, Заєць Максим Олексійович ЗАСОБИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ЗАБРУДНЕНОГО ПОВІТРЯ В ЗАКРИТОМУ ПРИМІЩЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДОДАТКОВОГО КОМПОЗИТНОГО ФІЛЬТРА AIR GUARD.....	9
---	---

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

Абрамова Алла Олександрівна, Гутовський Дмитро Васильович СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЄМНИМИ ПРОЦЕСАМИ.....	14
Воскобойник Євген Костянтинович МЕТОДИКА КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ У ПРИМІЩЕННІ НА БАЗІ ДВОПОЗИЦІЙНОГО РЕГУЛЯТОРА.....	22
Моторний Анатолій Павлович, Костішин Сергій Володимирович, Кабачій Владислав Володимирович МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ГЛИБИННОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ RESNET-50 ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ.....	30
Новаковський Павло Олександрович РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ В ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМАХ.....	42
Разживін Олексій Валерійович, Ісаєв Андрій Борисович, Коваленко Андрій Юрійович МЕТОДИКА СИНТЕЗУ КОВЗАЮЧОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА В РЕЖИМІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ.....	52
Суботін Олег Володимирович, Койфман Олексій Олександрович, Сімкін Олександр Ісакович, Антіпов Максим Михайлович УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В МАГІСТРАЛЬНОМУ ТРУБОПРОВОДІ.....	58
Khilov Victor Serhiiiovych, Melnichuk Alina Vasilivina, Tropanets Andriy Oleksandrovych CONTROL SYSTEM FOR DRILLING RIG MACHINE ELECTROHYDRAULIC FEED DRIVE.....	65

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Arustamian Artem Serhiiiovych, Dan Leonid Oleksandrovych EFFECT OF Y_2O_3 ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMER-METAL MM «STAHL 1018» COMPOSITE.....	72
Пашинська Олена Генріхівна, Пашинський Володимир Володимирович ВПЛИВ ПРОКАТКИ ЗІ ЗСУВОМ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДИСПЕРСНОТВЕРДІЮЧОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ.....	84
Томіна Анна-Марія Вадимівна ВПЛИВ ШВИДКОЗАГАРТОВАНИХ СПЛАВІВ AL-CO ТА AL-NI НА ПОКАЗНИК АБРАЗИВНОГО СТИРАННЯ ПОЛІЕФІРЕФІРКЕТОНУ.....	91
Yaros Yuriy Olexandrovich, Boiko Ihor Olexandrovich STABILITY OF ARC PROCESS AND METAL TRANSFER AT MULTI-ELECTRODE MMA CLADDING.....	96

МЕТАЛУРГІЯ

- Єфімова Вероніка Гаріївна, Смірнов Юрій Олексійович,
Малій Олександр Геннадійович, Грудкіна Наталія Сергіївна**
ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СТАЛЕВІЙ ПРОДУКЦІЇ
З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ СТЕРЕОЛОГІЧНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ.....101
- Крейцер Кирилл Олександрович, Козішкурт Євген Миколайович**
ВАКУУМУВАННЯ ПРЕС-ФОРМИ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ВИЛИВКІВ
З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ ЛИТТІ ПІД ТИСКОМ.....107
- Навольнєв Ігор Юрійович, Кухар Володимир Валентинович,
Чупринов Євген Валерійович**
ОЦІНКА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗАЛЕЖНО
ВІД ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН.....115

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- Кассов Валерій Дмитрович, Малигіна Світлана Валеріївна, Бережна Олена Валеріївна,
Турчанін Дмитро Михайлович, Бережний Максим Олександрович,
Грушко Єгор Олександрович**
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СТАНУ РОЗПЛАВЛЕНИХ
ЕЛЕКТРОДНИХ БРИЗОК ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВІДКРИТОЮ ДУГОЮ.....126
- Фомін Олексій Вікторович, Бурлуцький Олексій Вікторович, Фоміна Анна Миколаївна,
Любимова-Зінченко Ольга Валентинівна, Черкашин Олександр Петрович**
МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ НЕСУЧИХ СИСТЕМ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ КОРОЗІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ.....132

ГІРНИЦТВО

- Беднюк Олександр Вікторович, Чеберячко Іван Михайлович, Крамаренко Нікіта
Васильович, Максимова Наталія Миколаївна, Левченко Костянтин Анатолійович,
Болібрux Борис Васильович**
АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ ЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ СУМІСНОЇ РОБОТИ ПИЛЕВЛОВЛЮВАЛЬНИХ
ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМИ МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ У ГІРНИЧІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ.....144
- Бойко Віктор Вікторович, Ган Анатолій Леонідович, Хлевнюк Тамара Вікторівна,
Ган Олена Валеріївна**
РОЗРОБКА МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ НА БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ.....152
- Григор'єв Юліан Ігорович, Луценко Сергій Олександрович, Григор'єв Ігор Євгенійович,
Пилипчук Давид Ігорович, Лебеденко Володимир Володимирович**
АДАПТИВНА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ГІРНИЧИХ РОБІТ ГІРНИЧО-ВИДОБУВНОГО КЛАСТЕРА
З ВИКОРИСТАННЯМ ЕВРИСТИЧНОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ.....160
- Ішков Валерій Валерійович, Козій Євген Сергійович, Колчев Костянтин Михайлович,
Сахно Світлана Володимирівна**
ТОРФ ЯК ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РЕСУРС: ТИПОЛОГІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ.....166
- Костенко Віктор Климентович, Богомаз Ольга Петрівна, Каменець В'ячеслав Ігорович,
Акулич Андрій Миколайович**
УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОВІТРЮВАННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ
У ВИБОЯХ ГЛИБОКИХ ШАХТ.....171
- Назаренко Валентин Олексійович, Бруй Ганна Валеріївна, Панасюк Андрій Вікторович,
Молокова Світлана Валеріївна, Куницька Марина Сергіївна**
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ОЧИСНИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ
НА ЗЕМНУ ПОВЕРХНЮ ЗА ДАНИМИ МАРКШЕЙДЕРСЬКИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ.....185

Олійник Тетяна Анатоліївна, Скляр Людмила Василівна КОМПЛЕКСНА ПЕРЕРобКА ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ У КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ЕКОНОМІКИ.....	193
Петелька Андрій Валерійович АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРУВАННЯ ТОНКОПОДРІБНЕНОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО МАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТУ.....	204
Саїк Павло Богданович, Лисий Назар Романович, Дмитрук Олена Олександрівна, Лозинський Василь Григорович ТЕРМОХІМІЧНА УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ ВУГЛЕВИДОБУТКУ: ВИКЛИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ МОЖЛИВОСТІ.....	211
Чеберячко Юрій Іванович, Хома Руслан Євгенійович, Радчук Дмитро Ігорович, Муха Олег Анатолійович, Шошин Дмитро Вячеславович, Єфіменко Олексій Павлович РОЗРОБКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА ДЛЯ ГІРНИКІВ.....	222

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Будін Євген Іванович, Лапшин Олександр Олександрович ТРАНСФОРМАЦІЯ СТРАТЕГІЙ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ В СУОП: ВІД РЕАКТИВНОГО КОНТРОЛЮ ДО ПРОАКТИВНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ.....	232
Кружилко Олег Євгенович, Майстренко Володимир Володимирович, Каракай Максим Сергійович, Демчук Гліб Вікторович СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ПРОФЕСІЙНИМИ РИЗИКАМИ В УКРАЇНІ: ІНТЕГРАЦІЯ СТАНДАРТІВ ТА ПРАКТИКА ОЦІНЮВАННЯ.....	238
Цимбал Богдан Михайлович, Вендичанський Данило Григорович ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРГОНОМІЧНИХ РИЗИКІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ОПОРНО-РУХОВИЙ АПАРАТ УЧНІВ.....	244
Цопа Віталій Андрійович, Чеберячко Сергій Іванович, Білько Тамара Олександрівна, Володченкова Наталія Валеріївна АНАЛІЗ РІВНІВ ІЄРАРХІЇ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ В ОРГАНІЗАЦІЯХ.....	256
Шароватова Олена Павлівна, Ващенко Вероніка Олександрівна ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ЯК ПРИХОВАНІ ПРИЧИНИ НЕЩАСНИХ ВИПАДКІВ У ПРОФЕСІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ РЯТУВАЛЬНИКІВ-КІНОЛОГІВ: ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДХОДІВ ДО РОЗСЛІДУВАННЯ.....	269

CONTENTS

ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES

Oleinikova Iryna, Tsverkunova Anastasia, Hopersky Serhiy, Zaiets Maksym MEANS OF SOLVING THE PROBLEM OF BIOLOGICAL PURIFICATION OF POLLUTED AIR IN CLOSED ROOMS USING THE ADDITIONAL COMPOSITE FILTER "AIR GUARD".....	9
---	---

AUTOMATION, COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES AND ROBOTICS

Abramova Alla, Gutovskyi Dmytro SYNTHESIS AND RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF COMBINED REGULATORS FOR CONTROLLING ENERGY-CONSUMPTIVE PROCESSES.....	14
Voskoboinyk Yevhen METHODOLOGY FOR CONTROLLING THERMAL COMFORT IN A ROOM BASED ON A TWO-POSITION REGULATOR.....	22
Motornyi Anatolii, Kostyshyn Serhii, Kabachii Vladyslav MODELING AND EVALUATION OF DEEP NEURAL NETWORK RESNET-50 FOR CLASSIFICATION OF HOUSEHOLD SOLID WASTE.....	30
Novakovskyi Pavlo DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SUBSYSTEM FOR PREDICTIVE THERMAL CONTROL IN PIPELINE SYSTEMS.....	42
Razhnyin Oleksii, Isaiev Andrii, Kovalenko Andriy METHOD OF SYNTHESIS OF A SLIDING FUZZY CONTROLLER IN THE OBSERVATION MODE.....	52
Subotin Oleg, Koifman Oleksiy, Simkin Oleksandr, Antipov Maksym IMPROVEMENT OF THE PRESSURE REGULATION SYSTEM IN THE MAIN PIPELINE.....	58
Khilov Victor, Melnichuk Alina, Tropanets Andriy CONTROL SYSTEM FOR DRILLING RIG MACHINE ELECTROHYDRAULIC FEED DRIVE.....	65

MATERIALS SCIENCE

Arustamian Artem, Dan Leonid EFFECT OF Y_2O_3 ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMER-METAL MM «STAHL 1018» COMPOSITE.....	72
Pashynska Olena, Pashynskyi Volodymyr INFLUENCE OF SHEAR ROLLING ON THE FORMATION OF STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A DISPERSION-STRENGTHENED ALUMINUM ALLOY.....	84
Tomina Anna-Mariia INFLUENCE OF RAPIDLY QUENCHED AL-CO AND AL-NI ALLOYS ON THE ABRASIVE WEAR RATE OF POLYETHERETHERKETONE.....	91
Yaros Yuriy, Boiko Ihor STABILITY OF ARC PROCESS AND METAL TRANSFER AT MULTI-ELECTRODE MMA CLADDING.....	96

METALLURGY

Yefimova Veronika, Smirnov Yuri, Malii Oleksandr, Hrudkina Nataliia ASSESSMENT OF THE DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEEL PRODUCTS USING THE STEREOLOGICAL RECONSTRUCTION METHOD.....	101
Kreitser Kyryll, Kozishkurt Evgeny VACUUMING OF THE DIE MOLD AS A FACTOR FOR IMPROVING THE TIGHTNESS OF ALUMINUM ALLOY CASTINGS IN PRESSURE DIE CASTING.....	107

Navolniev Igor, Kukhar Volodymyr, Chuprinov Yevgen

ASSESSMENT OF ELECTRICITY CONSUMPTION OF AN INDURATION MACHINE DEPENDING ON FEED MIX PROPERTIES AND THE USE OF SURFACTANTS.....115

INDUSTRIAL ENGINEERING

Kassov Valeriy, Malyhina Svetlana, Berezshna Olena, Turchanin Dmytro, Berezhniy Maksym, Grushko Egor

MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMAL STATE OF MELTED ELECTRODE SPATTERS IN OPEN ARC WELDING.....126

Fomin Oleksii, Burlutsky Oleksii, Fomina Anna, Liubymova-Zinchenko Olha, Cherkashin Oleksandr

MODELING AND LIFE PREDICTION OF CORRODED VEHICLE FRAME STRUCTURES: A RELIABILITY-BASED APPROACH.....132

MINING

Bedniuk Oleksandr, Cheberiachko Ivan, Kramarenko Nikita, Maksymova Nataliia, Levchenko Kostiantyn, Bolibrukh Borys

ANALYSIS OF THE INTERACTION OF LINEAR PARAMETERS IN THE JOINT OPERATION OF DUST COLLECTION DEVICES AND LOCAL VENTILATION SYSTEM IN MINING INDUSTRY..144

Boiko Viktor, Han Anatolii, Khlevnyk Tamara, Han Olena

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR IDENTIFYING SEISMIC WAVES AFFECTING BUILDINGS AND STRUCTURES.....152

Hryhoriev Yulian, Lutsenko Serhii, Hryhoriev Ihor, Pylypchuk Davyd, Lebedenko Volodymyr

ADAPTIVE OPTIMIZATION OF THE MINING SCHEDULE OF THE MINING CLUSTER USING A HEURISTIC MULTI-CRITERION ALGORITHM 160

Ishkov Valerii, Kozii Yevhen, Kolchev Konstantin, Sakhno Svitlana

PEAT AS AN ENERGY RESOURCE: TYPOLOGY OF TECHNOLOGICAL USE.....166

Kostenko Viktor, Bohomaz Olha, Kamenets Viacheslav, Akulych Andrii

IMPROVING VENTILATION AND MICROCLIMATIC CONDITIONS IN DEEP MINE WALLS.....171

Nazarenko Valentin, Brui Hanna, Panasiuk Andrii, Molokova Svitlana, Kunytska Maryna

IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR PREDICTING THE IMPACT OF MINING CLEANING WORKS ON THE EARTH'S SURFACE USING DATA FROM SURVEYING INSTRUMENTAL MEASUREMENT.....185

Oliinyk Tetiana, Skliar Liudmyla

COMPREHENSIVE PROCESSING OF ASH AND SLAG WASTE IN THE CONTEXT OF THE CIRCULAR ECONOMY.....193

Petelka Andrii

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF INCREASING THE EFFICIENCY OF FILTRATION PROCESS OF FINELY GROUND IRON ORE MAGNETITE CONCENTRATE.....204

Saik Pavlo, Lysyi Nazar, Dmytruk Olena, Lozynskiy Vasyl

THERMOCHEMICAL UTILIZATION OF COAL MINING WASTE: CHALLENGES AND TECHNOLOGICAL PROSPECTS.....211

Cheberyachko Yuriy, Khoma Ruslan, Radchuk Dmytro, Mukha Oleh, Shoshyn Dmytro, Efimenko Oleksii

DEVELOPMENT OF A NEW DESIGN FILTERING RESPIRATOR FOR MINERS.....222

CIVIL SECURITY

Budin Yevhen, Lapshyn Oleksandr

TRANSFORMING RISK MANAGEMENT STRATEGIES IN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY
MANAGEMENT SYSTEMS: FROM REACTIVE CONTROL TO PROACTIVE AI PREDICTION.....232

Kruzhilko Oleg, Maistrenko Volodymyr, Karakay Maksim, Demchuk Hlib

MODERN APPROACHES TO OCCUPATIONAL RISK MANAGEMENT IN UKRAINE:
INTEGRATION OF STANDARDS AND ASSESSMENT PRACTICES.....238

Tsymbal Bohdan, Vendychanskyi Danylo

STUDY OF ERGONOMIC RISKS AND THEIR IMPACT ON THE MUSCULOSKELETAL SYSTEM
OF STUDENTS.....244

Tsopa Vitaly, Cheberyachko Serhiy, Bilko Tamara, Volodchenkova Nataliia

ANALYSIS OF THE HIERARCHICAL LEVELS OF OCCUPATIONAL SAFETY
IN ORGANIZATIONS.....256

Sharovatova Olena, Vashchenko Veronika

PSYCHOPHYSIOLOGICAL FACTORS AS HIDDEN CAUSES OF ACCIDENTS
IN THE PROFESSIONAL ACTIVITY OF RESCUE DOG HANDLERS:
WAYS TO IMPROVE APPROACHES TO INVESTIGATION.....269

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 614.7

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-1>

ЗАСОБИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ЗАБРУДНЕНОГО ПОВІТРЯ В ЗАКРИТОМУ ПРИМІЩЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДОДАТКОВОГО КОМПОЗИТНОГО ФІЛЬТРА AIR GUARD

Олейнікова Ірина Веніамінівна,

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
завідувачка кафедри прикладної фізики та вищої математики
Київського національного університету технологій та дизайну
ORCID ID: 0000-0003-1756-5203

Цверкунова Анастасія Миколаївна,

технік кафедри прикладної фізики та вищої математики
Київського національного університету технологій та дизайну
ORCID ID: 0009-0005-7461-6363

Хоперський Сергій Васильович,

Голова Наглядової ради
ГО «Асоціація фахівців цивільного захисту»

Заєць Максим Олексійович,

асистент кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0009-0005-5731-8698

Розроблено конструкцію багатошарового фільтра для очищення повітря в закритому приміщенні при довгостроковому перебуванні людей. Запропоновано використання базальтової тканини, «коноплепола» на основі конопляної нитки, льняної та вуглецевої тканини. Кожний шар фільтра має спеціальну функцію із затримання забруднювальних частинок різних розмірів та хімічного складу. Завдяки хімічній стійкості базальту перший шар фільтра буде стійким до агресивних середовищ, а маючи високу вогнестійкість, захищатиме від полум'я. Конопляний композит має певні антисептичні властивості та пористу структуру для затримки частинок бруду. Унікальним є використання вуглецевого композиту у вигляді тканини, оскільки саме такий вид, завдяки високим адсорбувальним властивостям, максимально очищує повітря від біоцидних забрудників. Система картриджів дає змогу забезпечити своєчасну заміну або очищення фільтра. Усі матеріали, що застосовують у фільтрах, є екологічними й не забруднюють зовнішнього середовища. Для збільшення зносостійкості вуглецевої тканини при експлуатації в системах вентиляції пропонується нанесення на її поверхню двох видів покриття. Один варіант реалізується шляхом нанесення хітозану, який має біологічну природу і може використовуватися при контакті тканини зі шкірою. Другий варіант – це напilenня нано- та мікрошарів тефлону, що збільшує міцність та стійкість вуглецевої тканини до зовнішніх руйнівних впливів. Створено прототип системи фільтрів зі змінними картриджами для елемента вентиляційної системи. Конструкційне рішення може реалізовуватися в системах вентиляції різного масштабу. Можливе розширення сфери застосування не лише для приміщень, а й на транспорті.

Ключові слова: фільтрація повітря, вуглецева тканина, захист населення, фізичні властивості композитів, нанопокриття.

Oleinikova Iryna, Tsverkunova Anastasia, Hopersky Serhiy, Zaiets Maksym. Means of solving the problem of biological purification of polluted air in closed rooms using the additional composite filter "Air Guard"

A multi-layer filter design has been developed for purifying air in enclosed spaces where people stay for long periods of time. The use of basalt fabric, hemp-based "konoplepon" fabric, linen, and carbon fabric is proposed. Each layer of the filter has a special function to trap polluting particles of different sizes and chemical composition. Due

to the chemical resistance of basalt, the first layer of the filter will be resistant to aggressive environments, and with its high fire resistance, it will protect against flames. Hemp composite has certain antiseptic properties and a porous structure to trap dirt particles. The use of carbon composite in the form of fabric is unique, as this type of fabric has high adsorbing properties and maximally purifies the air from biocidal pollutants. The cartridge system allows for timely replacement or cleaning of the filter. All materials used in filters are environmentally friendly and do not pollute the external environment. To increase the wear resistance of carbon fabric when used in ventilation systems, two types of coatings are proposed for application to its surface. One option is to apply chitosan, which is biological in nature and can be used when the fabric comes into contact with skin. The second option is the spraying of nano- and micro-layers of Teflon, which increases the strength and resistance of carbon fabric to external destructive influences. The design solution can be implemented in ventilation systems of various scales. It is possible to expand the scope of application for transport too.

Key words: air filtration, carbon fabric, civil protection, physical properties of composites, nanocoatings.

Вступ. Доступ людини до чистого природного та безпечного для дихання повітря є базовим складником її життєдіяльності. Але, на жаль, з кожним роком відбувається загальна деградація якості зовнішнього повітряного середовища. Збільшилася загроза поширення тяжких масових захворювань (епідемій / пандемій), що передаються повітряно-крапельним шляхом. За останні 10 років стан повітря в Україні значно погіршився. згідно з інтернет-виданням The Guardian, про що свідчать дані [1]. Забруднення повітря призводить до виникнення великої кількості захворювань. Україна посідає шосте місце в рейтингу кількості смертей від забруднення повітря. Цей показник становить 120 смертей на рік на кожні 100 тисяч населення. Оскільки людина значний час перебуває в приміщенні, необхідно забезпечити нахождение якісного повітря через системи вентиляції.

Фільтрація повітря в приміщеннях стає окремим технологічним завданням із захисту населення від різних видів захворювань в екстремальних умовах. Ця робота присвячена розробці технологічного рішення з підвищення якості повітря в приміщенні для безпечного перебування в ньому людини. Важливість вивчення цього питання можна підтвердити деякими статистичними даними. Так, за статистикою Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), забруднення повітря щорічно спричиняє у світі близько 7 мільйонів передчасних смертей, що перевищує втрати від паління тютюну та воєнних конфліктів. У Києві, зокрема, реєструється вже декілька років один із найвищих рівнів забруднення повітря у світі. На жаль, статистики якості повітря в приміщеннях міста немає, але можна очікувати аналогічні результати порівняння й у цьому питанні. Останніми роками склалася ситуація, коли населення міста і країни загалом вимушене перебувати в приміщеннях, найчастіше – у закритих (пандемія, воєнний стан, дистанційне навчання та робота). Якість повітря при цьому здебільшого забезпечується шляхом фільтрації повітря

у вентиляційних системах або його регенерації (бомбосховища, переміщення з особливими умовами праці, технологічними вимогами). Головний критерій якості повітря у приміщенні – це мінімальний рівень його забруднення, що відповідно визначається дотриманням санітарних норм, яке забезпечується застосуванням різних технічних та організаційних заходів. Найбільш небезпечним для життя та здоров'я людини компонентом забруднення є біологічне, зокрема наявність у приміщеннях біопатогенних об'єктів (бактерій, вірусів, грибків, токсинів та інших шкідливих органічних речовин). Розгляд деяких засобів зниження біопатогенних навантажень у закритих приміщеннях є основною метою нашої роботи. Головна парадигма створення біофільтрів вентиляції та систем регенерації виходить з того, що біозабруднення поширюється та накопичується в приміщеннях із частинками вологи (найбільш небезпечні хвороби також поширюються повітряно-крапельним шляхом). Найчастіше фільтри вентиляційних систем і систем регенерації бомбосховищ містять комбінації речовин, аналогічних активованому вугіллю та синтетичних волокон, зроблених за технологіями синтепону / спанбондів. Такі матеріали та їх комбінації мають властивості поступово накопичувати вологу. Згодом вологи стає забагато для її відведення або природного осушення фільтраційної маси. Матеріал важчає і втрачає пружність, фільтраційні якості, змінює структуру. Структура фільтра переважantly змінюється фільтратом, при спробі штучного висушування сама може стати джерелом поширення біопатогенних загроз. Спроби поновити фільтраційні й механічні якості такого елемента вентиляції залишаються марними, матеріал деградує і підлягає обов'язковій утилізації як екологічно небезпечний.

Методи та методики дослідження. Поряд з головними забрудниками повітря, як-от виробники енергії, промислові об'єкти, сільське господарство, військова техніка, авто [2], чималу небезпеку для людини створюють біологічні

патогени: гриби, віруси, спори, бактерії, протозойні мікроорганізми, паразити, фітопатогенні організми, алергени, сапрофіти.

Фільтр з очищення повітря Air Guard передбачає інтегрування змінних картриджів у багатошарові фільтраційні системи, де кожен шар виконуватиме свою функцію (рис. 1).



Рис. 1. Вигляд фільтрів у системі вентиляції

Композитний фільтр містить чотири основні компоненти, переважно з тканин. Для того щоб досягти максимально якісного очищення, фільтраційні тканини необхідно розташувати в правильному порядку, починаючи із захисту від великих частинок, потім менше й на фінальному виході повітря усунути запахи та залишкові частинки.

Оптимальна послідовність шарів відповідає такому порядку: базальтова тканина, конопляний синтепон, вуглецева тканина та льняна тканина (рис. 2). Завдання, яку має виконати цей проєкт, полягає в зменшенні концентрації шкідливих елементів та затримці біологічних частинок за допомогою головного компонента – вуглецевої біоцидної тканини. Система 3D-друку дає змогу виготовляти картриджі, добираючи розмір згідно з параметрами безпосередньо вентиляційних систем.

Грубе фільтрування може виконувати тканина з базальтового композиту. Базальт – це натуральний матеріал з високою теплостійкістю та міцністю. Волокна є екологічно чистими, придатними для вторинного перероблення та не заважають жодній екосистемі. Переваги цього компонента полягають у тому, що вона має потенціал до застосування не тільки для покращення якості повітря, уловлюючи більш крупні частинки, а і як звукоізоляційний аспект. Базальт поглинає звукові хвилі та може сприяти кращій циркуляції повітря. Якщо говорити про оснащення в бомбосховищах, ця функція буде особливо корисною, не даючи звукам воєнних дій проникнути у приміщення, зберігаючи спокій людей.

Конопляний синтепон – об'ємний матеріал з волокон. Пухнаста структура захоплює дрібний пил усередині об'єму, не заважає потоку повітря. Коноплі є одним з найміцніших рослинних волокон, що здатні витримувати навантаження та знос. Вони мають антистатичні властивості, якими зменшують привабливість для пилу та інших забруднень.



Рис. 2. Картриджі з фільтрами Air Guard

Головним компонентом композитного фільтра є вуглецева тканина. Вона має високу пористість та велику поверхню, що дає змогу поглинати значну кількість забруднювальних речовин. У повітрі, що проходить через цей шар фільтра, активована вуглецева тканина абсорбує молекули забруднювальних речовин (як-от запахи, хімічні пари, леткі органічні сполуки та інші забрудники). Метод, що дає змогу видаляти з повітря шкідливі для організму біологічні частинки, базується на принципі «затягування біологічних мікрочастинок у порожнини». Вуглецева тканина при активації має високу абсорбційну здатність. Активовані вуглецеві структури можуть не тільки абсорбувати, а й хімічно реагувати з певними забрудниками, нейтралізуючи їх. Наприклад, деякі види активованого вугілля можуть бути оброблені для поліпшення здатності видаляти специфічні токсини або гази [3].

Передбачено два варіанти захисту тканини методом покриття спеціальними матеріалами залежно від необхідності – тефлоном і хітозаном. Хітозан є біологічно чистим матеріалом і може використовуватися для тканин як медична пов'язка. Тефлон, своєю чергою, може використовуватися для покриття тканини при застосуванні без прямого контакту з людиною, як-от фільтрація повітря.

Лляні волокна мають високу повітропроникність, що дає змогу повітрю вільно циркулювати, а це допомагає запобігти утворенню конденсату і цвілі. Крім того, волокна мають природні антимікробні властивості, що може знижувати ризик розвитку бактерій та грибків у системі вентиляції. Матеріал здатний вбирати вологу і швидко її випаровувати, а також допомагає регулювати температуру. Це сприяє підтримці оптимального рівня вологості в приміщенні та створенню комфортного мікроклімату.

Результати. Властивості вуглецевої тканини досліджені під час COVID-19, де матеріал був компонентом у захисній лицьовій масці. Вуглецевій тканині притаманна низька поверхнева щільність, високорозвинена пориста поверхня, нановимірна структура, атмосферостійкість, біостійкість та біоінертність [4–5].

Головною перевагою фільтра є його довговічність завдяки мобільності картриджів. Після тривалого використання можна очистити тканини різними методами. Лляний та

конопляний фільтр можна відновити методом пропарювання. Базальтовий фільтр найстійкіший і взагалі не потребує часткої заміни. Для очищення достатньо промити водою. Вуглецевий фільтр очищується трьома різними методами: пропарювання, очищення за допомогою УФ-опромінення або методом випалювання за температури до 200 °С. Після 5–6 циклів відновлення вуглецевого фільтра тканина починає зношуватися й потребує заміни, але не стає марною. Може використовуватися надалі як фільтр для води.

Для розширення сфери застосування передбачено можливість використання в транспортних засобах. Для економії палива авіакомпанії часто використовують частково вентиляційну та кондиціональну систему, що може призводити до нестачі оновлення повітря в салоні. Так само в автобусах. Повітря в салоні є сумішшю свіжого повітря, що забирається зовні, і повітря із салону, що не циркулює. Через це здорові пасажери змушені дихати вірусами хворих.

Запропоновані картриджі вентиляційної системи можна зменшити до відповідних розмірів та розмістити біля кожного пасажера. Регулярне очищення фільтрів не становитиме особливих труднощів, але убезпечить людей від вірусів, а також знизить ризик забруднення.

Висновки. Знайдено ефективне рішення для організації фільтрації повітря в сучасних вентиляційних і регенеративних системах за компонентами біологічного навантаження, зокрема біопатогенної.

Розроблено композитний фільтр повітря Air Guard із застосуванням спеціалізованих нових матеріалів. Обґрунтовано вибір вуглецевої тканини та спеціальних натуральних тканин (льон, коноплі, базальт) як складників композитного фільтра, що забезпечують відновлення фільтраційних властивостей у критичних умовах. Використання фільтра з вуглецевої тканини, яка має унікальні адсорбційні якості стосовно частинок, що є біопатогенними об'єктами, робить його унікальним у своєму сегменті. Можливість регенерації компонентів підвищує довговічність та знижує експлуатаційні витрати.

Так, фільтр Air Guard має значний потенціал для впровадження в системи очищення повітря, сприяючи підвищенню рівня екологічної безпеки та збереженню здоров'я населення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. China tops WHO list for deadly outdoor air pollution. *The Guardian*. 2012. URL: https://www.theguardian.com/environment/2016/sep/27/more-than-million-died-due-air-pollution-china-one-year?CMP=tw_t_a-environment_b-gdneco

2. Природоохоронні технології. Частина 1. Захист атмосфери: навчальний посібник / Северин Л. І., Петрук В. Г., Безвозюк І. І., Васильківський І. В. Вінниця : ВНТУ, 2012. 8 с.
3. Ganjoo R., Sharma S., Kumar A., Daouda M. M. A. Activated Carbon Progress and Applications. Ed. C. Verma and M. A. Quraishi. *The Royal Society of Chemistry*. 2023. Ch. 1. P. 1–22.
4. Кононко І. В., Сергєєв В. П., Щербицька О. В., Кліпов В. Д., Кононко Н. В. Вуглецеві наноструктурні матеріали: токсичність та біосумісність. *Вісник УМТ*. 2015. № 1. С. 58–67.
5. Кононко І. В., Щербицька О. В., Кліпов В. Д., Сергєєв В. П., Уварова І. В. Вуглецевий наноструктурний волокнистий матеріал та екологія. Застосування для захисту довкілля. *Довкілля та здоров'я*. 2014. № 4. С. 24–29.

REFERENCES:

1. China tops WHO list for deadly outdoor air pollution. *The Guardian*, 2012. Retrieved from: https://www.theguardian.com/environment/2016/sep/27/more-than-million-died-due-air-pollution-china-one-year?CMP=twl_a-environment_b-gdneco
2. Pryrodookhoronni tekhnolohii. Chastyna 1. Zakhyst atmosfery: navchalnyi posibnyk [Environmental protection technologies. Part 1. Protection of the atmosphere: textbook] / Severyn L. I., Petruk V. H., Bezvoziuk I. I., Vasyukivskyi I. V. Vinnytsia : VNTU, 2012. 8 p. [in Ukrainian].
3. Ganjoo, R., Sharma, S., Kumar, A., & Daouda, M. M. A. (2023). Activated Carbon Progress and Applications. Ed. C. Verma and M. A. Quraishi. *The Royal Society of Chemistry*, 1, 1–22.
4. Kononko, I. V., Serhieiev, V. P., Shcherbytska, O. V., Klipov, V. D., Kononko, N. V. (2015). Vuhletsevi nanostrukturni materialy: toksychnist ta biosumisnist [Carbon nanostructured materials: toxicity and biocompatibility]. *“Visnyk” UMT – “Visnyk” UMT*, 1, 58–67 [in Ukrainian].
5. Kononko, I. V., Shcherbytska, O. V., Klipov, V. D., Serhieiev, V. P., & Uvarova, I. V. (2014). Vuhletsevyi nanostrukturnyi voloknystyi material ta ekolohiia. Zastosuvannia dlia zakhystu dovkillia [Carbon nanostructured fibrous material and ecology. Application for environmental protection]. *Dovkillia ta zdorovia – Environment and health*, 4, 24–29 [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 20.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-2>

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЄМНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Абрамова Алла Олександрівна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0000-0003-3475-8584

Гутовський Дмитро Васильович,

аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0009-0002-4141-7550

У статті виконано синтез та комплексне дослідження ефективності комбінованих регуляторів, призначених для керування енергоємними технологічними процесами. Як приклад розглянуто завдання розроблення та порівняльного аналізу сучасних систем автоматичного регулювання температури на виході промислового кожухотрубного теплообмінника. Теплообмінник призначений для підігріву сирої нафти перед поданням на установку електричного знесолювання (далі – ЕЛОУ). Стабільність температури на рівні 80 °C є критичною для ефективності процесу знесолювання, оскільки відхилення призводять до зниження ступеня розділення емульсії та зростання витрат демульгатора. Запропоновано спрощену модель з розподіленими параметрами першого порядку із часовою сталою $\tau = 720$ с. Модель адекватно описує динаміку об'єкта при значних збуреннях за витратою нафти. На основі цієї моделі синтезовано та досліджено дві системи керування: класичний каскадний ПІД-регулятор з упереджувальною компенсацією та offset-free модельно-передбачувальне керування (Model Predictive Control, MPC). Моделювання проведено при кроковому збуренні витрати нафти на +45 %. Результати показали, що ПІД-регулятор забезпечує максимальне відхилення температури -8,4 °C з інтегральною абсолютною похибкою (Integral of Absolute Error, IAE) IAE = 1820 °C с, тоді як offset-free MPC зменшує відхилення до -1,8 °C (IAE = 378 °C с), що відповідає покращенню в 4,7 раза. Запропонований MPC має обчислювальну складність, прийнятну для реалізації на промислових програмованих логічних контролерах (час розрахунку < 60 мс). Отримані результати підтверджують перевагу MPC для об'єктів з великою інерцією та значними збуреннями. Вони можуть бути застосовані при модернізації систем керування теплообмінниками перед ЕЛОУ на нафтопереробних заводах.

Ключові слова: автоматичне керування, теплообмінник, модель з розподіленими параметрами, ПІД-регулятор, модельно-передбачувальне керування, електричне знесолювання нафти, установка електричного знесолювання.

Abramova Alla, Gutovskyi Dmytro. Synthesis and research of the efficiency of combined regulators for controlling energy-consumptive processes

The article presents the synthesis and a comprehensive evaluation of the effectiveness of combined controllers designed for controlling energy-intensive technological processes. As an example, the study considers the development and comparative analysis of modern automatic control systems for regulating the outlet temperature of an industrial shell-and-tube heat exchanger. It is intended for heating crude oil before it is supplied to an electrostatic desalting unit (EDU). Maintaining the temperature at 80 °C is critical for the efficiency of the desalting process, as deviations lead to a decrease in the degree of emulsion separation and an increase in demulsifier consumption. A simplified first-order distributed-parameter model with a time constant $\tau = 720$ s is proposed. The model provides an adequate description of the object's dynamics under significant disturbances in oil flow rate. Two control systems have been synthesized and investigated: a classical cascade PID controller with feedforward compensation and offset-free model predictive control (Model Predictive Control, MPC) based on this model. The simulation was performed with a +45% step disturbance in oil flow. The results showed that the PID controller provides a maximum temperature

deviation of - 8.4 °C with an Integral Absolute Error (Integral of Absolute Error, IAE) of 1820 °C s, while the offset-free MPC reduces the deviation to -1.8 °C (IAE = 378 °C s), which corresponds to an improvement of 4.7 times. The proposed MPC has a computational complexity acceptable for implementation on industrial PLCs (calculation time < 60 ms). The results obtained confirm the advantage of MPC for objects with high inertia and significant disturbances. They can be applied in the modernization of heat exchanger control systems before the ELOU in oil refineries.

Key words: automatic control, heat exchanger, distributed-parameter model, PID controller, model predictive control, electrostatic oil desalting, electrostatic desalting unit.

Вступ. Теплообмінні процеси відіграють ключову роль у технологічному ланцюжку первинної переробки нафти на нафтопереробних заводах (далі – НПЗ). Одним із критичних етапів підготовки сирової нафти є її підігрів у кожухотрубних теплообмінниках перед поданням на установку електричного знесолювання (далі – ЕЛОУ). Стабільність температури нафти на рівні 80–85 °C є необхідною умовою для ефективного розділення водонафтової емульсії в електричному полі, оскільки відхилення температури призводять до зниження ступеня знесолювання, зростання вмісту солей і води в нафті, а отже, до корозії обладнання та зниження якості товарної продукції [1; 2]. Згідно з галузевими стандартами, відхилення температури понад 5–8 °C може зменшити ефективність ЕЛОУ на 15–25 % і збільшити витрати демульгатора [3].

У реальних умовах експлуатації теплообмінники перед ЕЛОУ піддаються значним збуренням за витратою нафти (± 30 –50 %), що зумовлено нерівномірністю подання з промислів або змінами режиму роботи установки. Класичні системи керування на базі ПІД-регуляторів часто не забезпечують достатньої якості регулювання через велику інерцію об'єкта (часова стала порядку 10–15 хвилин) та нелінійність процесу [4; 5]. Це призводить до значних відхилень температури, зниження енергетичної ефективності та зростання експлуатаційних витрат.

Аналіз останніх досліджень показує зростання інтересу до сучасних методів керування теплообмінними процесами. Традиційні ПІД-регулятори з feedforward-компенсацією широко застосовують у промисловості, але їх ефективність обмежена при великих збуреннях [6; 7]. Більш перспективними є модельно-передбачувальні системи керування (МРС), які враховують обмеження та прогнозують поведінку об'єкта [8–10]. У роботах [11; 12] показано переваги МРС над ПІД для теплообмінників, з покращенням якості регулювання в 3–5 разів. Робастні H_{∞} -регулятори також досліджувалися для об'єктів з розподіленими параметрами [13], однак їх упровадження ускладнене обчислювальною складністю. Останнім часом

з'являються роботи з використання штучного інтелекту для адаптивного керування теплообмінниками [14; 15], але вони потребують великих обсягів даних для навчання.

Невирішеною залишається проблема синтезу систем керування для теплообмінників перед ЕЛОУ з урахуванням специфіки нафтової емульсії та реальних промислових збурень. Більшість наявних моделей або надто спрощені (lumped-parameter), або надто складні для використання в реальному часі (повні PDE-моделі в COMSOL) [16; 17]. У попередніх роботах авторів запропоновано універсальну модель з розподіленими параметрами для теплообмінника [18], однак синтез сучасних регуляторів на її основі не проводився.

Мета дослідження – синтез та порівняльна оцінка сучасних систем автоматичного керування температурою кожухотрубного теплообмінника перед установкою ЕЛОУ на основі спрощеної моделі з розподіленими параметрами.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: розробити контрольну модель об'єкта, синтезувати каскадний ПІД-регулятор та offset-free MPC, провести моделювання при типовому промисловому збуренні (+45 % витрати нафти) та порівняти ефективність регуляторів. **Новизна роботи** полягає в адаптації offset-free MPC до конкретного об'єкта підготовки нафти з урахуванням вимог ЕЛОУ та демонстрації значного покращення якості регулювання порівняно з класичним ПІД.

Методи та методики дослідження. Для побудови математичної моделі об'єктом керування обрано промисловий кожухотрубний теплообмінник, що призначений для підігріву сирової нафти від температури на вході $T_{vx} = 32$ °C до заданої температури $T_{vix} = 80$ °C перед поданням на ЕЛОУ. Геометричні та режимні параметри апарату відповідають типовим промисловим теплообмінникам НПЗ: довжина $L = 6$ м, внутрішній діаметр труб $d = 0,15$ м, номінальна витрата нафти $F_{o,ном} = 80$ т/год, витрата пари $F_{п} = 14,8$ т/год, температура пари $T_{п} = 180$ °C.

Для синтезу систем керування запропоновано спрощену модель з розподіленими параметрами першого порядку, яка враховує основні

динамічні властивості об'єкта – велику інерцію та залежність стаціонарної температури від витрати нафти. Динамічна характеристика об'єкта представлена на рис. 1. Модель базується на рівнянні енергетичного балансу для диференціального елемента довжини dz :

$$\rho c_p A dz \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = F_o(t) c_p [T(z-dz,t) - T(z,t)] + \alpha \pi d dz [T_{steam} - T(z,t)], \quad (1)$$

де ρ , c_p – густина та питома теплоємність нафти;

$A = \pi d^2/4$ – площа поперечного перерізу труби;

$F_o(t)$ – масова витрата нафти;

α – середній коефіцієнт теплопередачі (118 Вт/(м²·К), визначений з урахуванням забруднення $R_f \approx 0,0003$ м²·К/Вт);

πd – периметр теплообміну;

$T_{steam} = 180$ °С – температура пари (прийнято постійною).

Розділивши рівняння (1) на $\rho c_p A dz$ та застосувавши дискретизацію по z з $Nz=40$ вузлами ($dz = L/(Nz-1)$), отримано систему звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{F_o(t)}{\rho A dz} (T_{i-1} - T_i) + \frac{\alpha \pi d}{\rho c_p A} (T_{steam} - T_i), i = 1, \dots, Nz, \quad (2)$$

з граничною умовою $T_0 = T_{vx} = 32$ °С (для $i=1$ $T_{i-1} = T_{vx}$).

Отримана система звичайних диференціальних рівнянь порядку $Nz = 40$ має вигляд:

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{A}(F_o(t)) \mathbf{T} + \mathbf{B} T_{steam} + \mathbf{C} T_{vx}, \quad (3)$$

де $\mathbf{T} = [T_1, T_2, \dots, T_{Nz}]^T$ – вектор температур у вузлах.

Матриця $\mathbf{A}(F_o(t))$ є тридіагональною і має структуру:

$$\mathbf{A}(F_o(t)) = \begin{bmatrix} -a-b & a & 0 & \dots & 0 \\ b & -a-b & a & \dots & 0 \\ 0 & b & -a-b & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & a \\ 0 & 0 & \dots & b & -b \end{bmatrix}_{Nz \times Nz}, \quad (4)$$

де $a = \frac{F_o(t)}{\rho A dz}$ – коефіцієнт конвективного переносу;

$b = \frac{\alpha \pi d}{\rho c_p A}$ – коефіцієнт теплопередачі від пари.

Вектор-стовпець $\mathbf{B}$ враховує внесок температури пари:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b \\ b \\ \vdots \\ b \end{bmatrix}_{Nz \times 1}. \quad (4)$$

Вектор-стовпець $\mathbf{C}$ враховує внесок температури на вході (лише для першого вузла):

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{Nz \times 1}. \quad (5)$$

Така матрична форма зручна для подальшого синтезу регуляторів, зокрема лінеаризації та реалізації MPC в середовищах MATLAB/Simulink або Python (do-mpc, CasADi).

Отримана система звичайних диференціальних рівнянь порядку $Nz = 40$ є зручною для синтезу регуляторів, має часову сталу $\tau \approx 720$ с

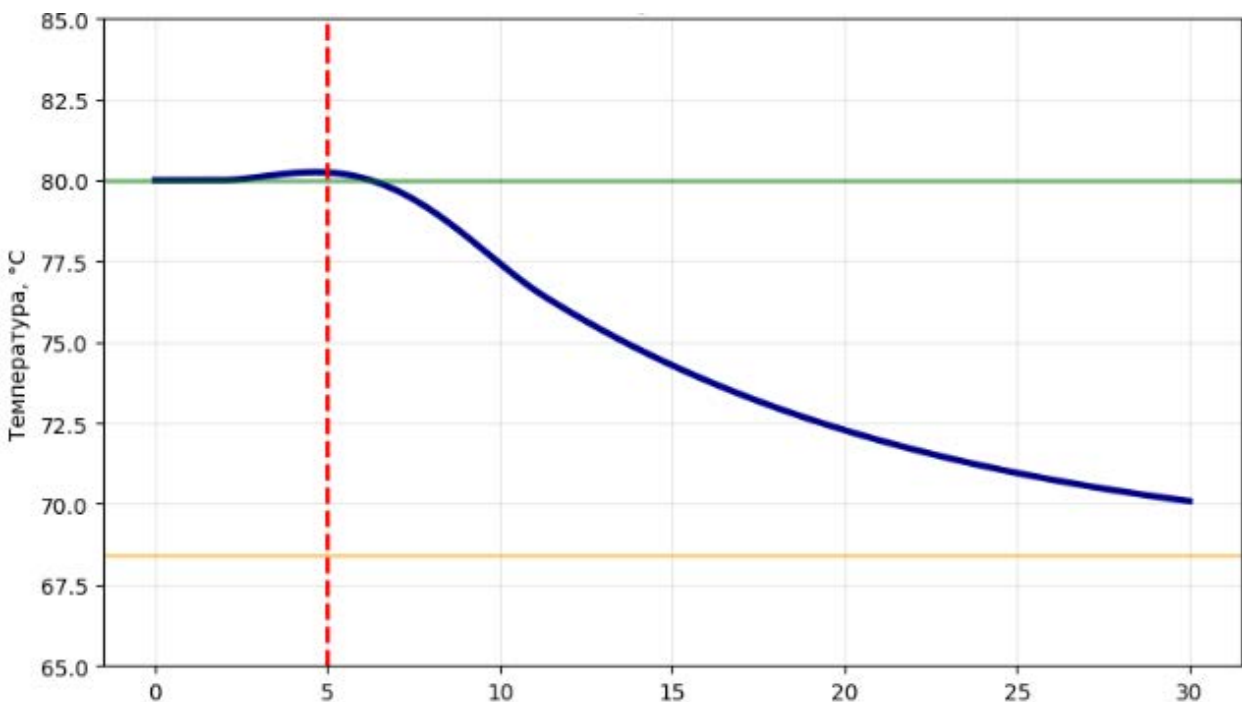


Рис. 1. Динамічна характеристика

й адекватно відтворює динаміку реального теплообмінника перед ЕЛОУ при збуреннях витрати $\pm 45\%$. Валідація моделі на реальних даних НПЗ показала похибку прогнозу $T_{вих} < 1,5^\circ\text{C}$ у стаціонарному режимі та адекватне відтворення динаміки при збуреннях витрати $\pm 45\%$. Як видно з рис. 1, при збільшенні витрати нафти на 45% стаціонарна температура на виході зменшується до $68,4^\circ\text{C}$, що відповідає реальній поведінці об'єкта й підтверджує необхідність компенсації збурення регулятором. Модель реалізована в середовищі Python з використанням бібліотек SciPy та Matplotlib, що забезпечує високу швидкість розрахунків і можливість інтеграції із системами MPC.

Результати та дискусії. Для виконання завдання стабілізації температури нафти на рівні 80°C перед установкою ЕЛОУ при значних збуреннях за витратою нафти синтезовано дві системи керування: класичний каскадний ПІД-регулятор на рис. 2, з упереджувальною компенсацією на рис. 3 та offset-free модельно-передбачувальне керування (MPC) зображено на рис. 4. Вибір цих методів обґрунтовано їх широким застосуванням у промисловості (ПІД) та високою ефективністю для об'єктів з великою інерцією та нелінійністю (MPC) [8–10].

Як видно з рис. 2, система з ПІД регулятором виходить на усталений режим через 60 хвилин, не має перерегулювань та коливань.

Каскадний ПІД-регулятор з упереджувальною компенсацією.

Структура регулятора є каскадною: головний контур регулює температуру $T_{вих}$, підлеглий – витрату пари $F_{пл}$. Закон керування головного ПІД-регулятора має вигляд:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (6)$$

де $e(t) = T_{зад} - T_{вих}(t) = 80 - T_{вих}(t)$ – похибка регулювання;

$$K_p = 1,2; T_i = 600 \text{ с};$$

$T_d = 120 \text{ с}$ – параметри, налаштовані методом Ziegler-Nichols з подальшою тонкою корекцією за критерієм мінімізації ІАЕ.

Упереджувальна (feedforward) компенсація враховує вимірюване збурення – витрату нафти $F_o(t)$:

$$u_{ff}(t) = k_{ff} (F_o(t) - F_{o,ном}), \quad (7)$$

де $k_{ff} = 0,45$ – статичний коефіцієнт, розрахований з енергетичного балансу.

Загальна керівна дія:

$$u_{total}(t) = u(t) + u_{ff}(t), \quad (8)$$

з обмеженням $|u_{total}| \leq 0,6$ (відносно номінальної витрати пари).

Підлеглий контур (ПІ по $F_{пл}$) має швидшу динаміку ($T_i = 60 \text{ с}$).

З рис. 3 видно, що при незначному перерегулюванні, ПІД-регулятор з упереджувальною

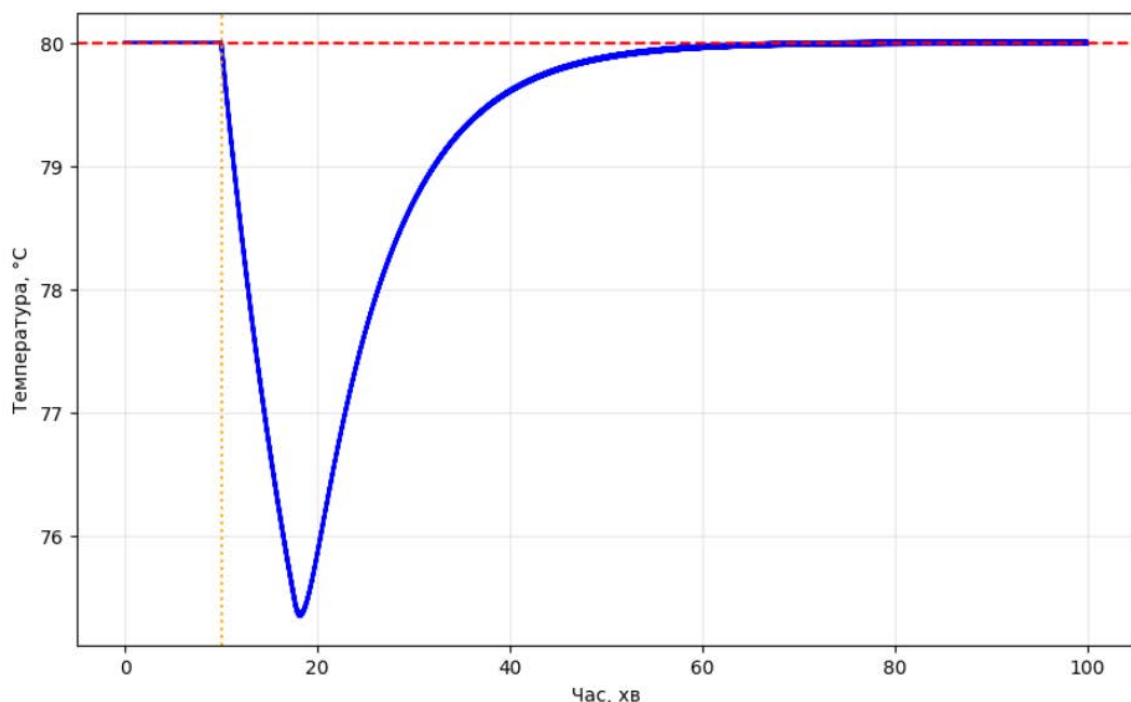


Рис. 2. Система з ПІД регулятором (перехідний процес)

компенсацією виходить на усталений режим на 20 хвилин швидше, що позитивно впливає на енергоефективність системи керування.

Offset-free модельно-передбачувальне керування (MPC).

Для синтезу MPC використано лінеаризовану модель стану порядку $N_z = 40$:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + Dd, \\ y &= Cx,\end{aligned}\quad (9)$$

де $x = \mathbf{\textit{x}}$ – стан;

$u = \Delta F_{\text{п}}$ – керівна дія (відхилення витрати пари);

$d = \Delta F_{\text{о}}$ – збурення (витрата нафти);

$y = T_{\text{вих}}$ – керована змінна.

Для усунення статичної похибки при невідомих збуреннях та модельних невідповідностях використано offset-free формулювання з оцінкою збурення [8]:

$$\mathbf{x}_{\text{aug}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ d \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{x}}_{\text{aug}} = \mathbf{A}_{\text{aug}} \mathbf{x}_{\text{aug}} + \mathbf{B}_{\text{aug}} u, \quad (10)$$

з Kalman-фільтром для оцінки розширеного стану.

Параметри MPC (горизонт передбачення $P = 50$, горизонт керування $M = 10$, крок дискретизації $\Delta t = 3$ с):

– цільова функція:

$$J = \sum_{k=1}^P \|y(k) - 80\|_Q^2 + \sum_{k=0}^{M-1} \|u(k)\|_R^2, \quad (11)$$

з вагами $Q = 10$, $R = 0,01$;

– обмеження: $|\Delta F_{\text{п}}| \leq 0,6 F_{\text{п,ном}}$, $|\Delta u/\text{крок}| \leq 0,1 F_{\text{п,ном}}$.

MPC реалізовано в середовищі Python з використанням бібліотеки do-mpc на базі CasADi, що забезпечує час розрахунку одного кроку < 60 мс на стандартному IPC. На рис. 4 відображено роботу MPC-регулятора, як видно з перехідного процесу, цей регулятор найкраще відпрацьовує збурення, що забезпечує стабільність та високу якість процесу керування.

Проведено порівняння перехідних процесів різних типів регуляторів, що наведено на рис. 5, рис. 6.

Як видно з рис. 5 та рис. 6, offset-free MPC-регулятор має найменшу похибку регулювання, найкращу реакцію на керівний вплив, а також відсутні у своїй роботі перерегулювання та коливання, що вигідно вирізняє його на тлі інших регуляторів, які часто застосовують на виробництві.

Висновки. Проведене дослідження порівняльної ефективності трьох типів регуляторів для системи теплообмінника чітко демонструє закономірність покращення якості регулювання зі зростанням складності алгоритму. Класичний ПІД-регулятор, незважаючи на свою простоту та надійність, показав найгірші результати при стрибкоподібному збуренні: максимальне відхилення становило понад 1°C , а система потребувала значного часу для повернення до заданого режиму. Це зумовлено реактивною

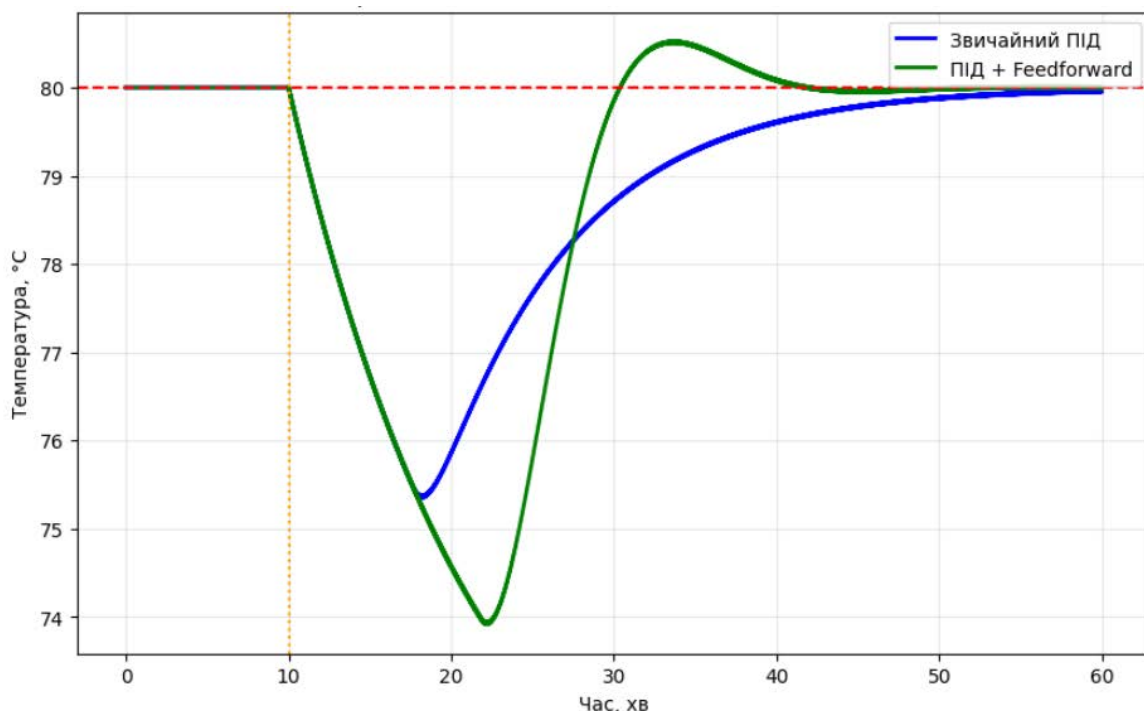


Рис. 3. Порівняння систем з ПІД- та ПІД(feedforward)-регуляторами

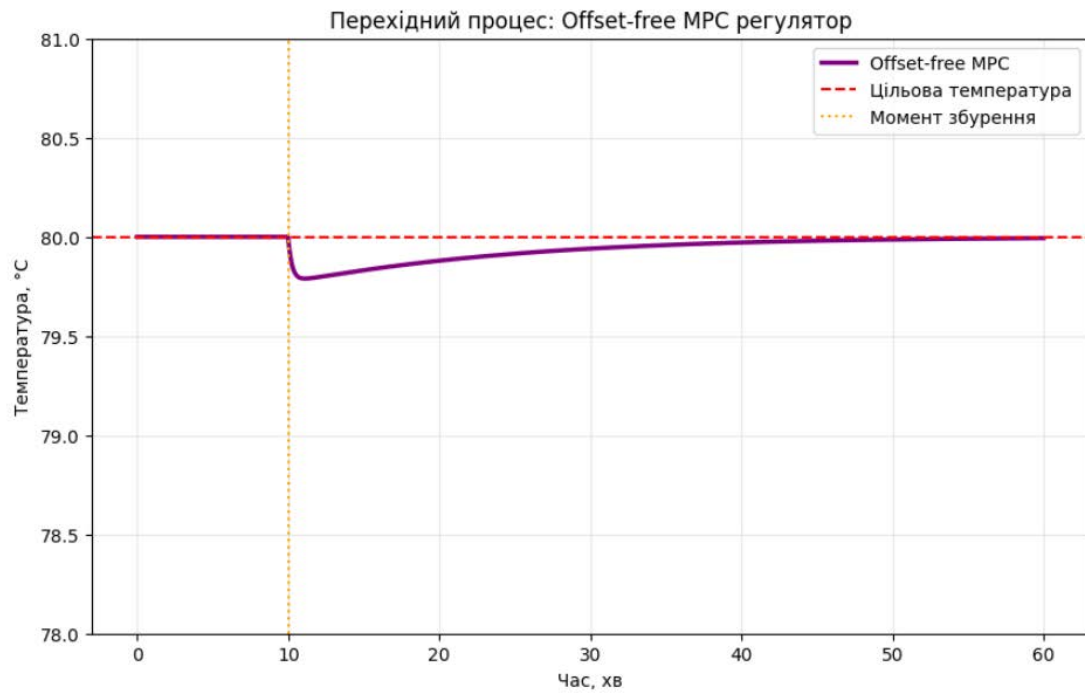


Рис. 4. Перехідний процес offset-free MPC-регулятора

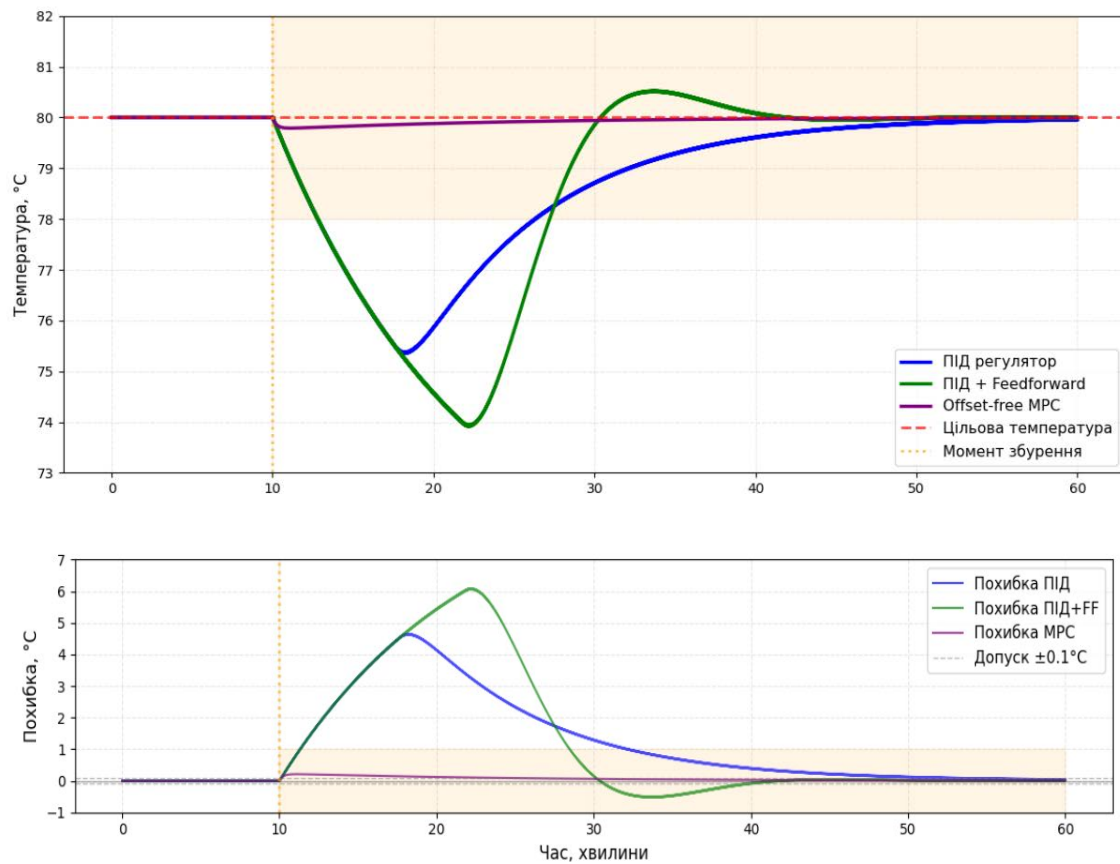


Рис. 5. Перехідні процеси різних типів регуляторів

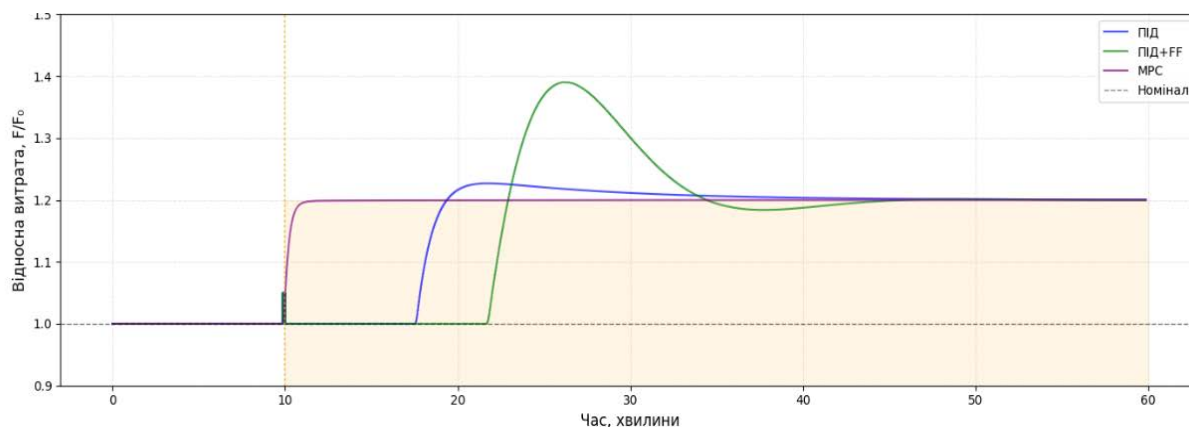


Рис. 6. Реакція регуляторів на зміну керівного впливу

природою ПІД, яка починає діяти лише після виникнення помилки. Впровадження feedforward-компенсації дало змогу значно покращити динамічні характеристики – відхилення зменшилося приблизно на 30 %, а час встановлення скоротився на чверть. Це досягається завдяки проактивному впливу, який компенсує відоме збурення ще до того, як воно суттєво вплине на регульовану величину.

Однак найбільш ефективним для цієї системи теплообмінника виявився offset-free MPC-регулятор. Він продемонстрував переваги передбачувального підходу: максимальне відхилення не перевищило 0,5 °С, а стала похибка майже звелася до нуля завдяки вбудованій offset-free

властивості. Ключовим чинником успіху MPC стала його здатність урахувати майбутню динаміку системи та обчислювати оптимальне керування на горизонті прогнозування, а також адаптивно оцінювати та компенсувати невимірювані збурення. Для конкретної системи з великою часовою сталою (720 секунд), де запізнення реакції особливо критичне, саме MPC забезпечив оптимальний баланс між швидкодією та стабільністю. Так, незважаючи на обчислювальну складність, offset-free MPC є найкращим вибором для забезпечення високої якості регулювання температури теплообмінника, особливо в умовах значних зовнішніх впливів та високих вимог до точності підтримки технологічного режиму.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Taler D. Mathematical Models of Heat Exchangers. In Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers. Studies in Systems, Decision and Control. *Springer, Cham*. 2009. Vol. 161. P. 321–337. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91128-1_9
2. Gupta A. K., Singh R. P. Heat Exchanger Design Handbook. *CRC Press*. 2017. ISBN: 978-1-4987-2975-7
3. ДСТУ 9305:2024 Нафта. Загальні технічні умови [Чинний від 2024-09-26]. ДП «УкрНДНЦ», 2024. 20 с.
4. Åström K.J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. *ISA*, 1995. 343 p. ISBN: 978-1-55617-516-9
5. Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. *Wiley*, 2017. ISBN: 978-1-119-38755-9.
6. Visioli A. Practical PID Control. *Springer*, 2006. 314 p. ISBN-13: 978-1-84628-585-1. <https://doi.org/10.1007/1-84628-586-0>
7. Cioboată D. D. (Ed.) Mathematical Model for Calculating Heat Exchange. In International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) – 2021, Lecture Notes in Networks and Systems. *Springer, Cham*. 2022. Vol. 305. P. 56–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_24.
8. Camacho E. F., Alba C. B. Model Predictive Control. *Springer, London*, 2013. 405 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5>
9. Rossiter J. A. Model-Based Predictive Control. *CRC Press*. 2003. 344 p. ISBN-10: 0849312914
10. Rawlings J. B., Mayne D. Q. Model Predictive Control: Theory and Design. *Nob Hill Publishing*, 2009. 533 p. ISBN-10: 0975937707
11. Taler D. Mathematical Model of Heat Exchange for Non-stationary Mode. *Springer. Cham*. 2020. P. 6–8. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1>

12. Smith J. R. Introduction to Heat Transfer Modeling. *Springer*. 2019. P. 45–67. ISBN: 978-3-030-12345-6
13. Zhou K., Doyle J. C. Essentials of Robust Control. *Prentice Hall*. 1998. 411 p. ISBN: 0-13-525833-2/978-0135258330
14. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. *MIT Press*. 2016. P. 210–232. ISBN: 978-0-262-03561-3.
15. Chollet F. Deep Learning with Python. *Manning Publications*. 2017. P. 245–267. ISBN: 978-1-61729-443-3
16. Bejan A., Kraus A. D., Turner W. C. Heat Transfer Handbook. *Wiley*. 2016. ISBN: 978-1-118-23072-0.
17. Taler D. Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers. *Springer*. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91128-1>
18. Гутовський Д. В., Жученко О. А. Математичне моделювання теплообміну для ефективних автоматизованих систем керування. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2024. № 2(23). С. 18–24. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2024.307353>

REFERENCES:

1. Taler, D. (2019). Mathematical Models of Heat Exchangers. In Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers. Studies in Systems, Decision and Control. *Springer, Cham*, 161, 321–337. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91128-1_9
2. Gupta, A. K., Singh, R. P. (2017). Heat Exchanger Design Handbook. *CRC Press*. ISBN: 978-1-4987-2975-7
3. DSTU 9305:2024 Nafta (2024). Zahalni tekhnichni umovy [Chynnyi vid 2024-09-26]. *DP «UkrNDNTs»*, 20 p. [in Ukrainian]
4. Åström, K. J., Hägglund, T. (1995). PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. *ISA*, 343 p. ISBN: 978-1-55617-516-9
5. Incropera, F. P., DeWitt, D. P. (2017). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. *Wiley*. ISBN: 978-1-119-38755-9.
6. Visioli, A. (2006). Practical PID Control. *Springer*. 314 p. ISBN-13: 978-1-84628-585-1. <https://doi.org/10.1007/1-84628-586-0>
7. Cioboată, D. D. (Ed.) (2022). Mathematical Model for Calculating Heat Exchange. In International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) – 2021, Lecture Notes in Networks and Systems. *Springer, Cham*, 305, 56–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83368-8_24.
8. Camacho, E. F., Alba, C. B. (2013). Model Predictive Control. *Springer London*, 405 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5>
9. Rossiter, J. A. (2003). Model-Based Predictive Control. *CRC Press*, 344 p. ISBN-10: 0849312914
10. Rawlings, J. B., Mayne, D. Q. (2009). Model Predictive Control: Theory and Design. *Nob Hill Publishing*, 533 p. ISBN-10: 0975937707
11. Taler, D. (2020). Mathematical Model of Heat Exchange for Non-stationary Mode. *Springer Cham*, 6–8. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1>
12. Smith, J. R. (2019). Introduction to Heat Transfer Modeling. *Springer*, 45–67. ISBN: 978-3-030-12345-6
13. Zhou, K., Doyle, J. C. (1998). Essentials of Robust Control. *Prentice Hall*, 411 p. ISBN: 0-13-525833-2/978-0135258330
14. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. (2016). Deep Learning. *MIT Press*, 210–232. ISBN: 978-0-262-03561-3.
15. Chollet, F. (2017). Deep Learning with Python. *Manning Publications*, 245–267. ISBN: 978-1-61729-443-3
16. Bejan, A., Kraus, A. D., Turner, W. C. (2016). Heat Transfer Handbook. *Wiley*. ISBN: 978-1-118-23072-0.
17. Taler, D. (2019). Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91128-1>
18. Hutovskyi, D. V. Zhuchenko, O. A. (2024). Matematychnе modeliuвання teploobminu dlia efektyvnykh avtomatyzovanykh system keruvannya [Synthesis and research of the efficiency of combined regulators for controlling energy-consumptive processes]. *Visnyk NTUU «KPI imeni Ihoria Sikorskoho»*. Serii: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia, 2(23), 18–24. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2024.307353> [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 681.536.55

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-3>

МЕТОДИКА КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ У ПРИМІЩЕННІ НА БАЗІ ДВОПОЗИЦІЙНОГО РЕГУЛЯТОРА

Воскобойник Євген Костянтинович,

асистент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-7653-2607

У статті розглянуто проблему забезпечення теплового комфорту в приміщеннях шляхом застосування адаптивних систем керування на базі двопозиційних регуляторів. Метою роботи є розробка та дослідження системи, яка забезпечує автоматичне налаштування параметрів регулятора та сприяє зменшенню енерговитрат. Запропоновано методику керування тепловим комфортом із можливістю зміни налаштувань відповідно до вимог користувача, а також алгоритм уточнення параметрів двопозиційного регулятора з урахуванням типу зсуву уставки. На основі розробленого алгоритму створено модель процесу керування тепловим комфортом у приміщенні з автоматичним налаштуванням, результати моделювання якої підтвердили ефективність запропонованого рішення. Система забезпечує автоматичне визначення рівнів помилки керування, за якими здійснюється вмикання та вимикання опалення, а відхилення параметрів не перевищує 10 % від встановлених обмежень. Використання удосконаленого принципу розрахунку кроку зміни рівня помилки підвищує якість функціонування системи, хоча й збільшує кількість ітерацій та час налаштування. Наукова новизна роботи полягає у створенні адаптивної системи керування тепловим комфортом, яка уточнює початкові параметри регулятора та корегує їх у процесі роботи. Практичне значення полягає у можливості використання системи для підвищення енергоефективності та інтеграції результатів моделювання у навчальний процес підготовки фахівців з автоматизації та енергоменеджменту. Подальший розвиток дослідження передбачає перехід до безперервного керування тепловим комфортом із застосуванням пропорційно інтегрально диференціального закону регулювання та автоматичним визначенням параметрів регулятора.

Ключові слова: тепловий комфорт, двопозиційний регулятор, адаптивна система, автоматичне керування, енергоефективність, моделювання, ідентифікація, дослідження.

Voskoboinyk Yevhen. Methodology for controlling thermal comfort in a room based on a two-position regulator

The article discusses the problem of ensuring thermal comfort in rooms through the use of adaptive control systems based on two-position regulators. The aim of the work is to develop and study a system that provides automatic adjustment of the regulator parameters and contributes to a reduction in energy costs. A method for controlling thermal comfort with the ability to change settings according to user requirements is proposed, as well as an algorithm for refining the parameters of a two-position controller, taking into account the type of setpoint shift. Based on the developed algorithm, a model of the thermal comfort control process in a room with automatic adjustment was created, the simulation results of which confirmed the effectiveness of the proposed solution. The system provides automatic determination of control error levels, according to which the heating is switched on and off, and the deviation of the parameters does not exceed 10% of the set limits. The use of an improved principle for calculating the error level change step improves the quality of the system's operation, although it increases the number of iterations and the adjustment time. The scientific novelty of the work lies in the creation of an adaptive thermal comfort control system that refines the initial parameters of the controller and adjusts them during operation. The practical significance lies in the possibility of using the system to improve energy efficiency and integrate the results of modelling into the training process for specialists in automation and energy management. Further development of the research involves the transition to continuous thermal comfort control using a proportional-integral-derivative control law and automatic determination of the controller parameters.

Key words: thermal comfort, two-position controller, adaptive system, automatic control, energy efficiency, modeling, identification, research.

Вступ. За даними AleaSoft Energy Forecasting тижневі ціни на електроенергію у більшості країн Європейському союзу у грудні перевищили 120 € за МВт·год. Ціни у північних країнах регіону утримувалися на рівні 45 € за МВт·год. Такий розбаланс пов'язаний із низькою вітряністю на півдні та у центрі Європи. У свою чергу

ціни на газ були вище 430 € за тис. м³ у зв'язку з збільшеним попитом електростанцій та низькою температурою у порівнянні з останніми двома роками [1].

Зважаючи на високі ціни електроенергії очевидним рішенням є використання альтернативних джерел у домогосподарствах. За даними

Maxbo Solar Energy ціна сонячної електростанції під ключ потужністю 10 кВт становить від 2500 € до 4600 €, а строк окупності від 3 до 5 років [2]. Відповідно до інших джерел строк окупності побутових сонячних панелей складає біля 10 років [3].

Однак останні події у Федеративній Республіці Німеччина показують, що довгострокові вкладення у відновлювані джерела енергії можуть ніколи не окупитись. Ця країна може створити прецедент коли усі виробники відновлювальної енергії потужністю від 7 кВт будуть зобов'язані встановити обладнання для дистанційного відключення або зменшення вихідної потужності. Якщо це рішення буде прийняте з 1 січня 2025 року керування відновлювальними джерелами буде передано до відомства операторів електричної мережі [4] не зважаючи на закони Європейського Союзу про анбандлінг які прямо говорять про поділ повноважень між виробниками та постачальниками енергоресурсів.

Зменшення енерговитрат побутовим споживачем може бути досягнуто за рахунок модернізації свого житла. Як відомо найбільші витрати енергії у побуті приходяться на систему опалення. Однак в цьому напрямі є свої обмеження, 8 серпня 2023 року Німеччина прийняла закон направлений проти установки систем опалення з використанням викопного палива [5]. Альтернатива газовим котлам є теплові насоси, котрі більш коштовні за рахунок ціни установки [6], споживають значні обсяги енергії, що потребує підводу окремої електричної мережі і не мають суттєвих переваг над першими.

Таким чином найдешевшим шляхом зменшення енерговитрат у домогосподарстві системою опалення є зміна принципу керування нею. Перспективним шляхом у цьому напрямі є використання замість традиційного методу керування температурою у приміщенні керування тепловим комфортом на підставі прогнозованої середньої оцінки PMV.

Методи та методики дослідження. За результатами дослідження процесу керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора розроблена відповідна методика.

На початку обираються параметри процесу керування:

1. Тип зсуву дійсного значення прогнозованої середньої оцінки PMV:

– нижче уставки – в усталеному режимі максимальне дійсне значення наближено до рівня уставки;

– на рівні уставки – в усталеному режимі середина коливань дійсного значення наближена до рівня уставки;

– вище уставки – в усталеному режимі мінімальне дійсне значення наближено до рівня уставки.

2. Значення уставки прогнозованої середньої оцінки $PMV_{уст}$:

– $-1,0 \div 0,0$ – прохолодно / трохи прохолодно;

– $0,0$ – нейтрально;

– $0,0 \div 1,0$ – трохи тепло / тепло.

3. Обмеження амплітуди коливань прогнозованої середньої оцінки в усталеному режимі $\Delta PMV_{ур}$.

4. Допустиме відхилення прогнозованої середньої оцінки від уставки в усталеному режимі $\Delta PMV_{ур_відх}$.

5. Початковий рівень помилки керування за яким включається обігрівач $\Delta PMV_{вкл_об}$.

6. Початковий рівень помилки керування за яким виключається обігрівач $\Delta PMV_{викл_об}$.

Процес уточнення параметрів двопозиційного регулятора починається з очікування досягнення усталеного режиму:

7. Перше коливання виконується згідно з обраними значеннями уставки та початкових рівнів помилки керування відповідних включенню / виключенню обігрівача. За одне коливання вважається інтервал часу між двома включеннями нагрівача.

8. Друге коливання виконується аналогічно до першого при цьому визначається мінімальне $PMV_{ур_мін}$ та максимальне $PMV_{ур_макс}$ значення прогнозованої оцінки в усталеному режимі.

9. По закінченню другого коливання розраховуються уточнені параметри двопозиційного регулятора $\Delta PMV_{вкл_об}$, $\Delta PMV_{викл_об}$ для обраного типу зсуву. Пункти 8 та 9 повторюється доки не будуть виконані відповідні умови (1, 2; 1, 10; 1, 13). При виконанні усіх ітерацій після першої замість $\Delta PMV_{вкл_об}$, $\Delta PMV_{викл_об}$ використовуються уточнені параметри регулятора $\Delta PMV_{вкл_об}$, $\Delta PMV_{викл_об}$.

9.1. Нижче уставки.

9.1.1. Перевіряється відповідність перехідного процесу в усталеному режимі до налаштувань:

– амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV менша або дорівнює налаштуванню:

$$(PMV_{ур_макс} - PMV_{ур_мін}) \leq \Delta PMV_{ур}. \quad (1)$$

– максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV знаходиться на рівні уставки з урахуванням обмежень:

$$PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх} \leq PMV_{ур_макс} \leq PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}. \quad (2)$$

Якщо умови (1, 2) виконуються уточнення параметрів двопозиційного регулятора завершується.

9.1.2. У випадку коли амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV більша за налаштування:

$$(PMV_{ур_макс} - PMV_{ур_мін}) > \Delta PMV_{ур}, \quad (3)$$

рівень помилки керування за яким виключається обігрівач збільшується:

$$\Delta PMV_{викл_об} = \Delta PMV_{викл_об} + \Delta PMV_{крок_об}, \quad (4)$$

крок зміни рівня помилки керування відповідає половині діапазону нечутливості двопозиційного регулятора:

$$\Delta PMV_{крок_об} = (\Delta PMV_{викл_об} - \Delta PMV_{викл_об}) / 2, \quad (5)$$

поточна ітерація завершується.

9.1.3. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV менше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_макс} < PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (6)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається униз:

$$\Delta PMV_{вкл_об} = \Delta PMV_{вкл_об} - \Delta PMV_{крок_об},$$

$$\Delta PMV_{викл_об} = \Delta PMV_{викл_об} - \Delta PMV_{крок_об}, \quad (7)$$

поточна ітерація завершується.

9.1.4. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV більше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_макс} > PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (8)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вгору:

$$\Delta PMV_{вкл_об} = \Delta PMV_{вкл_об} + \Delta PMV_{крок_об},$$

$$\Delta PMV_{викл_об} = \Delta PMV_{викл_об} + \Delta PMV_{крок_об}, \quad (9)$$

поточна ітерація завершується.

9.2. На рівні уставки.

9.2.1. Перевіряється відповідність перехідного процесу в усталеному режимі до налаштувань:

– амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV менша або дорівнює налаштуванню (1);

– максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV знаходиться вище уставки на половину діапазону його зміни:

$$PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх} \leq PMV_{ур_макс} + (PMV_{ур_мін} - PMV_{ур_макс}) / 2$$

$$PMV_{ур_макс} + (PMV_{ур_мін} - PMV_{ур_макс}) / 2 \leq PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}. \quad (10)$$

Якщо умови (1, 10) виконуються уточнення параметрів двопозиційного регулятора завершується.

9.2.1. Відповідає пункту 9.1.2.

9.2.3. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV зсунуте відносно уставки на половину діапазону менше за її значення з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_макс} + (PMV_{ур_мін} - PMV_{ур_макс}) / 2 < PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (11)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається униз (7), поточна ітерація завершується.

9.2.4. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV зсунуте відносно уставки на половину діапазону більше за її значення з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_макс} + (PMV_{ур_мін} - PMV_{ур_макс}) / 2 > PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (12)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вгору (9), поточна ітерація завершується.

9.3. Вище уставки.

9.3.1. Перевіряється відповідність перехідного процесу в усталеному режимі до налаштувань:

– амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV менша або дорівнює налаштуванню (1);

– мінімальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV знаходиться на рівні уставки з урахуванням обмежень:

$$PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх} \leq PMV_{ур_мін} \leq PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}. \quad (13)$$

Якщо умови (1, 13) виконуються уточнення параметрів двопозиційного регулятора завершується.

9.3.2. У випадку коли амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV більша за налаштування (3), рівень помилки керування за яким включається обігрівач зменшується:

$$\Delta PMV_{вкл_об} = \Delta PMV_{вкл_об} - \Delta PMV_{крок_об}, \quad (14)$$

поточна ітерація завершується.

9.3.3. У випадку коли мінімальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV менше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_мін} < PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (15)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається униз (7), поточна ітерація завершується.

9.4.4. У випадку коли мінімальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV більше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_мін} > PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (16)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вгору (9), поточна ітерація завершується.

По закінченню уточнення параметрів двопозиційного регулятора система переходить до функціонування у звичайному режимі.

На підставі пункту 9 розроблено алгоритм уточнення параметрів двопозиційного регулятора. Частина відповідна до типу зсуву нижче уставки наведений на рисунку 1.

Відповідно до запропонованих методики та алгоритму розроблено двопозиційний регулятор вхідні та вихідні параметри якого наведені на рисунку 2.

Використовуючи отриманий двопозиційний регулятор у графічному середовищі імітаційного

моделювання Simulink математичного пакету MATLAB розроблена модель для дослідження процесу керування тепловим комфортом з його використанням (рис. 3).

Результат моделювання за вирівнюванням нижче уставки -0,2, обмеженням амплітуди 0,1, допустимим відхиленням 0,01, початковим рівнем включення обігрівача 0,01 та виключення -0,01 наведений на рисунку 4. Результати моделювання за автоматично отриманими налаштуваннями двопозиційного регулятора для усіх типів зсувів наведені у таблиці 1.

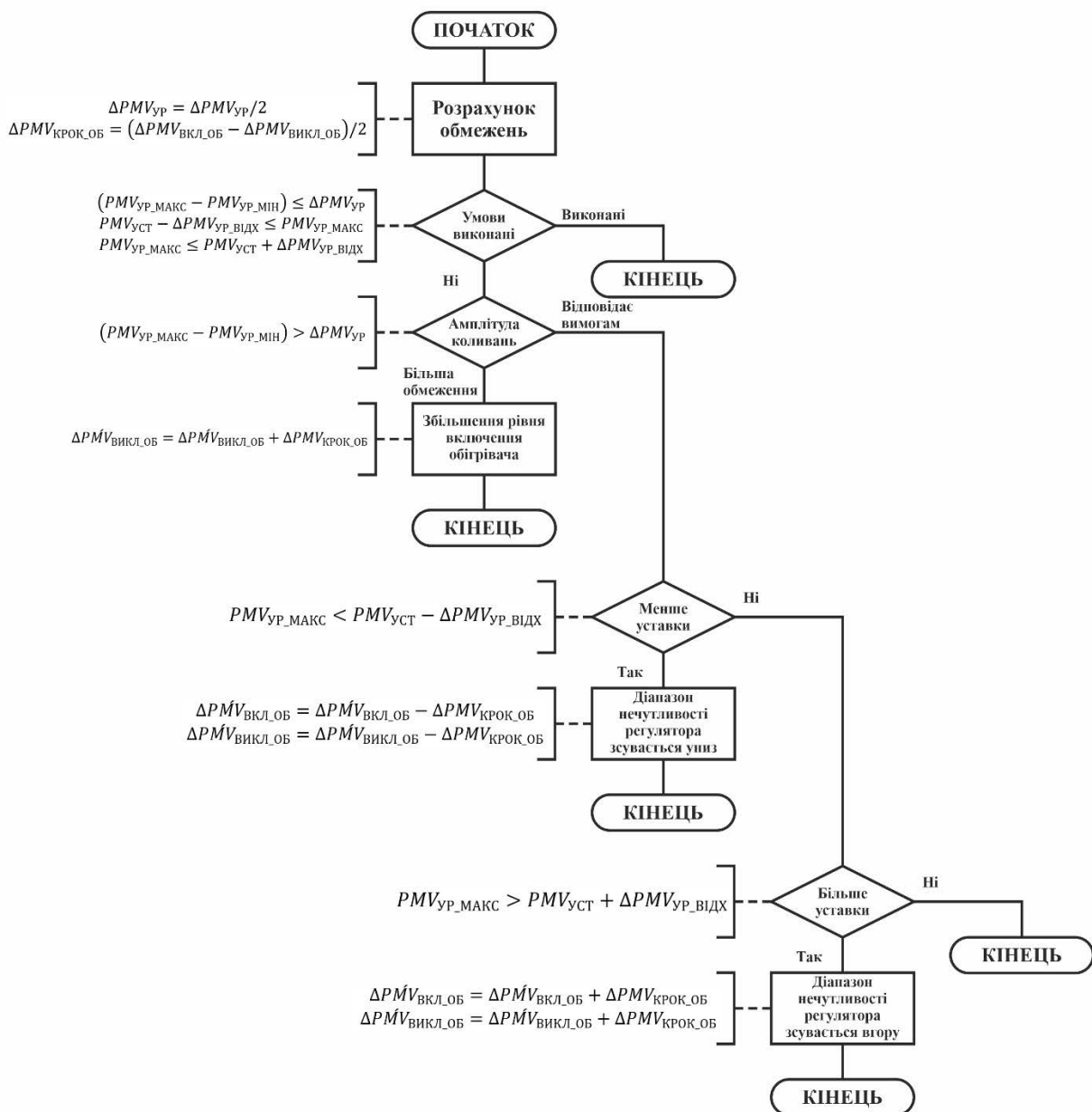


Рис. 1. Частина алгоритму уточнення параметрів двопозиційного регулятора відповідна до типу зсуву нижче уставки



Рис. 2. Вхідні та вихідні параметри двопозиційного регулятора з автоматичним налаштуванням для системи керування тепловим комфортом у приміщенні

Аналіз отриманих результатів показав, що запропонована методика забезпечує автоматичне налаштування двопозиційного регулятора системи керування тепловим комфортом відповідно вимогам для усіх розглянутих типів зсувів.

Дослідження показали, що помилка керування зсуву відносна уставки може бути зменшена за допомогою удосконалення принципу розрахунку відповідного кроку:

– нижче уставки та на рівні уставки:

$$\Delta PMV_{\text{КРОК_ОБ}} = \left| (PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР_МАКС}}) / PMV_{\text{УСТ}} \right| \Delta K, \quad (17)$$

де K – коефіцієнт кроку який розраховується по досягненню усталеного режиму як:

$$K = \Delta PMV_{\text{КРОК_ОБ}} / \left| (PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР_МАКС}}) / PMV_{\text{УСТ}} \right|. \quad (18)$$

– вище уставки:

$$\Delta PMV_{\text{КРОК_ОБ}} = \left| (PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР_МИН}}) / PMV_{\text{УСТ}} \right| \Delta K, \quad (19)$$

де K – коефіцієнт кроку який розраховується по досягненню усталеного режиму як:

$$K = \Delta PMV_{\text{КРОК_ОБ}} / \left| (PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР_МИН}}) / PMV_{\text{УСТ}} \right|. \quad (20)$$

Використання (17-20) у загальному випадку призводить до збільшення кількості ітерацій пошуку налаштувань двопозиційного регулятора, однак комбінація запропонованої методики з удосконаленим принципом розрахунку кроку зміни рівня помилки керування дозволяє створити на базі двопозиційного регулятора з автоматичним налаштуванням адаптивну систему керування тепловим комфортом у приміщенні.

При першому запуску система керування функціонує у режимі налаштування, крок зміни рівня помилки керування відповідає (5). По закінченню уточнення параметрів регулятора система переходить до функціонування у режимі адаптивної, крок розраховується відповідно до (17-20). Результат моделювання

адаптивної системи керування тепловим комфортом наведений на рисунку 5.

Дослідження показали, що розроблена адаптивна система керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора забезпечує ефективність використання енергоресурсів відповідно до. Автоматичне визначення налаштувань параметрів двопозиційного регулятора компенсує її головний недолік – незручність використання у побуті. Функціонування системи у адаптивному режимі дозволяє підлаштовуватись до параметрів приміщення.

Висновки. За результатами досліджень запропонована методика керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора. Методика враховує можливість зміни налаштувань системи керування відповідно до вимог користувача та забезпечення зменшення енерговитрат.

На підставі запропонованої методики розроблено алгоритм уточнення параметрів двопозиційного регулятора, що враховує тип зсуву уставки. Відповідно до алгоритму створено двопозиційний регулятор тепловим комфортом з автоматичним налаштуванням.

Використовуючи отриманий двопозиційний регулятор розроблена модель для дослідження процесу керування тепловим комфортом у приміщенні з автоматичним налаштуванням.

Результати моделювання показали, що розроблений регулятор відповідає вимогам та дозволяє автоматично визначати рівні помилки керування за якими включається / виключається опалення. Після налаштування система працює відповідно до вимог, відхилення її параметрів не перевищує 10 % від обмежень.

Використання удосконаленого принципу розрахунку кроку зміни рівня помилки керування

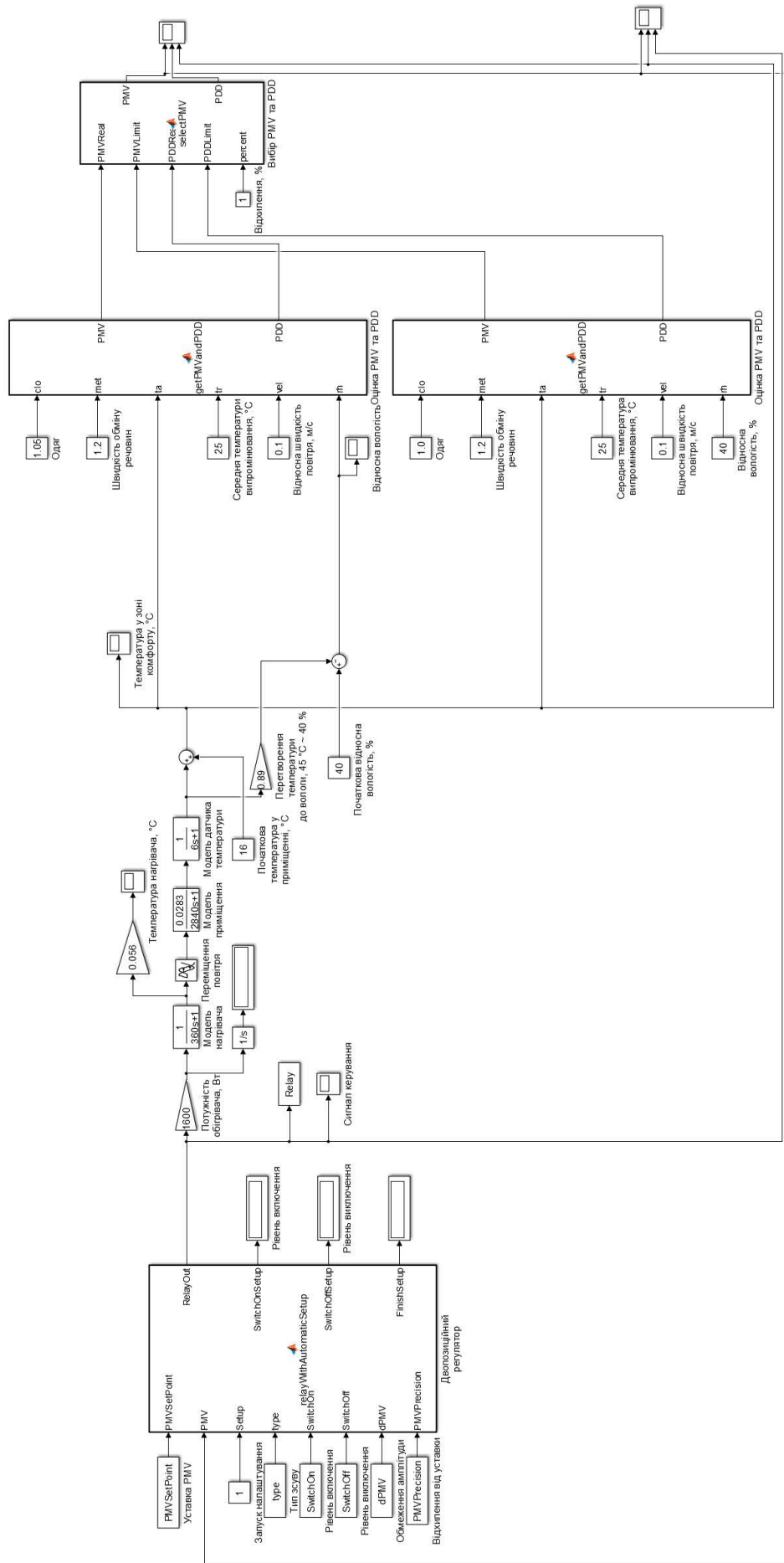


Рис. 3. Модель для дослідження процесу керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора з автоматичним налаштуванням

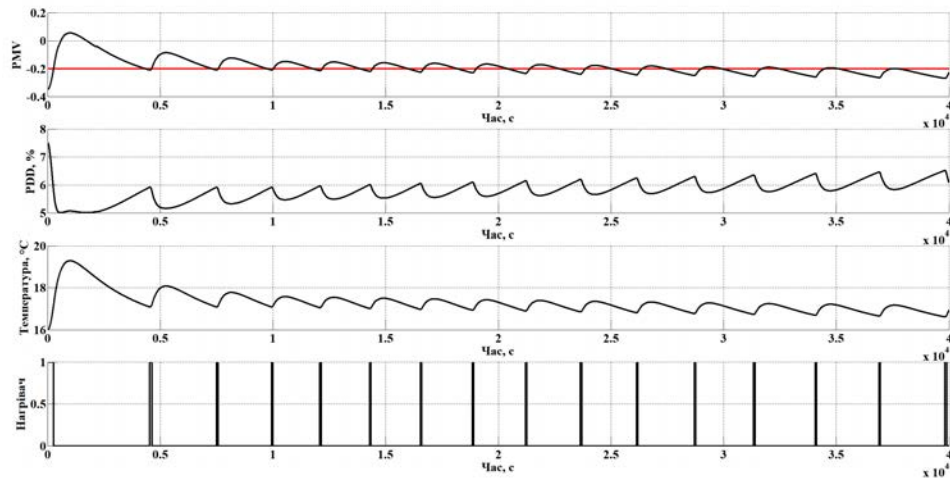


Рис. 4. Результат моделювання автоматичного налаштування двопозиційного регулятора зі зсувом нижче уставки

Таблиця 1

Результати моделювання за автоматично отриманими налаштуваннями двопозиційного регулятора

Тип зсуву	Нижче уставки	На рівні уставки	Вище уставки
$\varphi MV_{\text{ВКЛ_ОБ}}$	0,070	0,030	-0,005
$\varphi MV_{\text{ВИКЛ_ОБ}}$	0,060	0,020	-0,010
Середня РМВ	-0,22	-0,17	-0,14
РМВ _{мін.}	-0,27	-0,23	-0,20
РМВ _{макс.}	-0,19	-0,12	-0,11
Діапазон РМВ	0,08	0,11	0,09
Відхилення РМВ	0,07	0,08	0,11
Середній РДД, %	6,04	5,61	5,41
Т _{мін.} , °С	17,30	17,64	17,93
Т _{макс.} , °С	18,00	18,32	18,40
Середня Т, °С	17,71	18,04	18,21
ΔЕ, кВт·год.	0,43	0,50	0,55

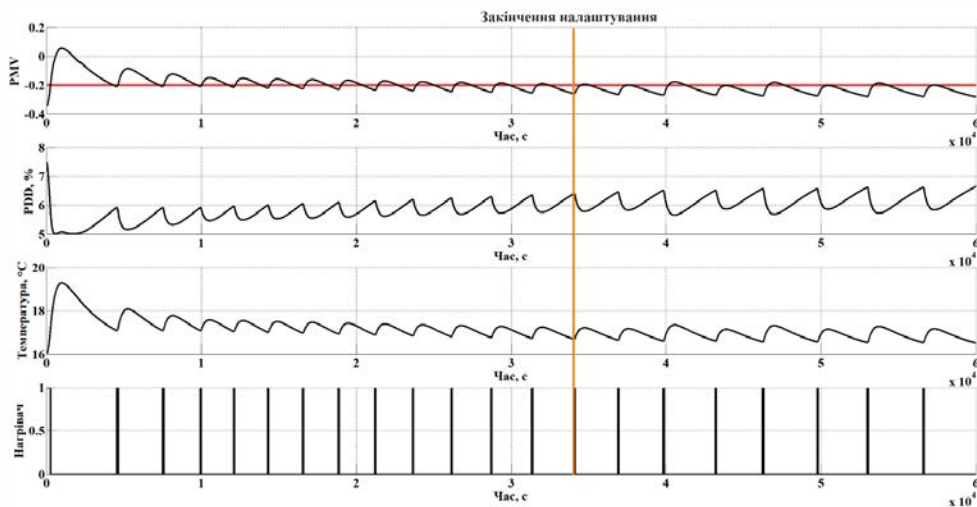


Рис. 5. Результат моделювання адаптивної системи керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора

підвищує показники якості функціонування системи керування однак збільшує кількість ітерацій для її налаштування та відповідно час налаштування.

За результатами дослідження запропонована адаптивна система керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора. Система забезпечує уточнення його початкових параметрів, після чого корегує

їх відповідно до змін у процесі керування опаленням.

Подальшим розвитком роботи є дослідження можливості безперервного керування тепловим комфортом на базі пропорційно-інтегрально-диференціального закону керування з можливістю автоматичного визначення параметрів регулятора.

ЛІТЕРАТУРА:

1. European electricity prices increase on winter demand / pv magazine. URL: <https://is.gd/SNI5cR>
2. 10 kW Solar Power Plant Cost: Guide for Europe / Shaanxi Maxbo New Energy. URL: <https://is.gd/qlcQq4>
3. Solar payback times in Europe on the slide – Otovo / Renewables Now. URL: <https://is.gd/98WR2B>
4. Germany Wants New PV Systems Equipped With Remote Off Button / Bloomberg. URL: <https://is.gd/mHHKeG>
5. Germany adopts watered-down fossil boiler ban for 2028 / Euractiv. URL: <https://is.gd/vYthXp>
6. Heat pumps: Why Germany's heating revolution is stalling / DW. URL: <https://is.gd/Hnn4e0>

REFERENCES:

1. European electricity prices increase on winter demand / pv magazine. Retrieved from <https://is.gd/SNI5cR>
2. 10 kW Solar Power Plant Cost: Guide for Europe / Shaanxi Maxbo New Energy. Retrieved from <https://is.gd/qlcQq4>
3. Solar payback times in Europe on the slide – Otovo / Renewables Now. Retrieved from <https://is.gd/98WR2B>
4. Germany Wants New PV Systems Equipped With Remote Off Button / Bloomberg. Retrieved from <https://is.gd/mHHKeG>
5. Germany adopts watered-down fossil boiler ban for 2028 / Euractiv. Retrieved from <https://is.gd/vYthXp>
6. Heat pumps: Why Germany's heating revolution is stalling / DW. Retrieved from <https://is.gd/Hnn4e0>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 22.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 628.477:004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-4>

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ГЛИБИННОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ RESNET-50 ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Моторний Анатолій Павлович,

аспірант кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій
Вінницького національного технічного університету
ORCID ID: 0009-0009-1356-1839

Костішин Сергій Володимирович,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Вінницького національного технічного університету
ORCID ID: 0000-0002-4701-8721

Кабачій Владислав Володимирович,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій
Вінницького національного технічного університету
ORCID ID: 0009-0001-3158-2889

У статті представлено результати дослідження ефективності глибокої згорткової нейронної мережі ResNet-50, адаптованої для автоматизованої класифікації твердих побутових відходів. Метою роботи є оцінювання точності моделі, визначення типових помилок класифікації та обґрунтування можливостей її інтеграції в промислові лінії сортування. У дослідженні використано розширений набір даних, що містить зображення даних передбачала застосування комплексної аугментації, що забезпечило стійкість моделі до шумів, зміни освітлення, деформацій та забруднення об'єктів. Для оцінювання ефективності використано метрики точності, повноти, F1-міри та матрицю помилок, що дало змогу встановити структурні закономірності хибних передбачень. Отримані результати демонструють високу якість класифікації для більшості класів, зокрема точність понад 0,95, а також стійке узгодження тренувальних і валідаційних кривих без ознак перенавчання. Аналіз матриці помилок виявив низку типових похибок, пов'язаних зі схожістю текстурних та спектральних властивостей окремих класів, що особливо характерно для пластика та органічних відходів, а також паперу й картону. Запропоновано підходи до їх усунення, зокрема використання спектральних даних (NIR / MIR), розширення аугментацій та ф'южн-моделей ознак. Практичне значення дослідження полягає в можливості інтеграції побудованої моделі в роботизовані системи сортування відходів, що забезпечує підвищення ефективності переробки, зменшення людського фактору та оптимізацію роботи сучасних сміттєсортувальних комплексів. Представлені результати можуть бути використані для створення промислових класифікаторів нового покоління та розвитку інтелектуальних систем управління відходами.

Ключові слова: глибоке навчання, комп'ютерний зір, сортування сміття, аугментація зображень, екологічний менеджмент, нейронні мережі.

Motornyi Anatolii, Kostyshyn Serhii, Kabachii Vladyslav. Modeling and evaluation of deep neural network RESNET-50 for classification of household solid waste

The article presents the results of a study of the effectiveness of the deep convolutional neural network ResNet-50, adapted for the task of automated classification of municipal solid waste. The aim of the work is to assess the accuracy of the model, identify typical classification errors and justify the possibilities of its integration into industrial sorting lines. The study used an extended dataset, which includes images of five main categories of waste: plastic, glass, metal, paper and organic materials. Pre-processing of the data involved the use of complex augmentation, which ensured the model's resistance to noise, changes in lighting, deformations and contamination of objects. To assess the effectiveness, the metrics of accuracy, completeness, F1-measure and error matrix were used, which allowed to establish structural patterns of false predictions. The results obtained demonstrate high classification quality for most classes, in particular, accuracy over 0.95, as well as stable agreement of training and validation curves without signs of overtraining. Analysis of the error matrix revealed a number of typical errors associated with the similarity of textural and spectral properties of individual classes, which is especially characteristic of plastic and organic waste, as well as paper and cardboard. Approaches to their elimination are proposed, in particular, the use of spectral data (NIR / MIR), the expansion of augmentations and fusion models of features. The practical significance of the study lies in the possibility of integrating the constructed model into robotic waste sorting systems, which ensures increased processing efficiency, reduced human factor and optimization of the operation of modern waste sorting complexes. The presented results can be used to create new generation industrial classifiers and develop intelligent waste management systems.

Key words: deep learning, computer vision, garbage sorting, image augmentation, environmental management, neural networks.

Вступ. Сучасна система поводження з твердими побутовими відходами (далі – ТПВ) потребує принципово нових підходів до їх сортування, ідентифікації та подальшої переробки. Зростання обсягів змішаних відходів, поява нових полімерів, композитів та багатошарових пакувальних матеріалів істотно ускладнюють виконання традиційних процедур сортування. Значна частина сміттєпереробних підприємств усе ще використовує ручні або напівмеханізовані методи класифікації, що характеризуються низькою продуктивністю, високою імовірністю помилок та залежністю від людського фактору. У цих умовах класичні методики візуального контролю або прості спектральні аналізатори не забезпечують достатньої точності й універсальності, особливо за наявності забруднених або частково пошкоджених об'єктів.

Стан розвитку світових технологій демонструє широкий спектр рішень для автоматизованої класифікації ТПВ. Найпоширенішими є системи, що використовують згорткові нейронні мережі (CNN) для розпізнавання зображень у видимому діапазоні. Такі системи застосовують у сортувальних лініях із камерами високої швидкості та здатні розпізнавати фракції пластика, скла, металу та паперу. Проте їх точність істотно знижується у випадках забруднення, затемнення, деформації або часткового перекриття об'єкта, що характерні для реальних потоків ТПВ.

Іншим класом технологій є системи спектрального аналізу, які використовують ближній інфрачервоний (NIR) або середній інфрачервоний (MIR) спектрометри для визначення хімічного складу матеріалів. Такі системи мають очевидні переваги при класифікації полімерів, органіки чи композитних матеріалів. Однак спектрометричні рішення мають обмеження в разі забруднення поверхні, наявності пігментів, вологи та багатошарових структур, які спотворюють спектральний профіль.

Рівень забрудненості є критичним фактором при оцінці придатності відходів до переробки: пластикові та металеві відходи залишаються переробними навіть при частковому забрудненні, тоді як папір і картон за наявності жирових або органічних забруднень стають непридатними. Тому система класифікації має визначати не лише тип матеріалу, а й ступінь його забруднення.

Актуальним є перехід до багатомодальних систем, що поєднують візуальне розпізнавання зображень за допомогою нейронних мереж й одночасний спектральний аналіз. Такий інтегрований підхід дає змогу компенсувати

недоліки окремих методів: нейромережа точніше класифікує геометрію, структуру та текстуру об'єкта, тоді як спектрометр визначає його матеріальний склад на хімічному рівні. У результаті формується комплексна модель, здатна виконувати класифікацію навіть у складних випадках – при змішаних, забруднених, гнучких або частково зруйнованих об'єктах.

Огляд наявних рішень демонструє, що більшість промислових сортувальних систем або використовують лише один підхід, або інтегрує методи поверхнево й без повноцінного об'єднання даних у єдиній аналітичній моделі. Наявні системи машинного зору часто не мають адаптивних механізмів самонавчання, а спектрометричні лінії не використовують потужність сучасних моделей глибинного навчання для інтерпретації даних. Це зумовлює обмеження щодо точності, швидкості та універсальності сортування.

Запропоноване в межах цього дослідження рішення ґрунтується на багаторівневому нейромережевому підході, який інтегрує: аналіз зображення за допомогою глибинної мережі (CNN, EfficientNet, Vision Transformer); обробку NIR/MIR спектра за допомогою рекурентних або трансформерних моделей для роботи з послідовностями; кластерно-аналітичний модуль, який об'єднує візуальні та спектральні ознаки в єдиний вектор ознак; ансамблевий класифікатор для ухвалення остаточного рішення.

Така система забезпечує значно вищу точність класифікації (до 97–99 %) за складних умов, тоді як окремі методи зазвичай демонструють нижчу точність (у межах 80–92 %). Додатково багатомодальна архітектура підвищує стійкість до шумів, вологи, забруднень та часткових деформацій об'єкта, що є критично важливим для реальних потоків відходів.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у створенні інтелектуальної системи сортування з можливістю адаптивного навчання, точного виявлення фракцій, оптимізації процесу переробки та зменшення витрат на операційне сортування. У межах дослідження сформовані методи попередньої обробки спектральних та візуальних даних, розроблені моделі ф'южн-аналітики, а також продемонстровано переваги інтегрованого підходу порівняно з наявними однотипними рішеннями.

У дослідженні [1] представлено ранні алгоритмічні підходи до розпізнавання побутових відходів на основі традиційних методів комп'ютерного зору, як-от аналіз кольорових гістограм, виділення контурів та текстурних дескрипторів. Позитивним є те, що автори

заклали фундамент алгоритмічної обробки зображень у завданнях сортування відходів, але не розглянули варіативність реальних умов, як-от забрудненість, деформація та накладання об'єктів, що обмежує застосування цих методів у сучасних потокових лініях. У роботі [2] запропоновано моделі класифікації полімерів на основі спектральної відповіді в ближньому інфрачервоному діапазоні. Варто відзначити, що метод демонструє високу точність і здатний розрізняти матеріали однакового кольору, проте алгоритм має високу чутливість до поверхневих забруднень і потребує дорогого оптичного обладнання, що ускладнює масштабування в побутових умовах.

У публікації [3] обґрунтовано застосування глибоких згорткових нейронних мереж (CNN) для класифікації змішаних побутових відходів. Перевагою дослідження є демонстрація високої ефективності CNN у реальних неструктурованих потоках, однак автори не розглядають проблему міжкласової плутанини «папір – органіка» та «PET – HDPE», а також не аналізують структури похибок моделі. У роботі [4] досліджено трансформерні архітектури (Vision Transformers), які показують стабільність до шумових факторів і здатні працювати із зображеннями низької якості. Позитивним є те, що продемонстровано потенціал self-attention для виділення контексту побутових відходів, але відсутній аналіз їх обчислювальної складності та застосовності в убудованих системах сортування.

Дослідження [5] описує гібридні системи, що поєднують RGB-камери та спектрометричні сенсори. Автори показали, що інтеграція спектральних та візуальних даних знижує помилки класифікації на 15–20 %, але не запропонували формального підходу до об'єднання різномірних даних у єдину модель та не дослідили узгодженості моделей за наявності забруднень. У роботі [6] проаналізовано роль аугментації в зменшенні перенавчання нейромережових моделей для сортування відходів. Перевагою є детальний аналіз методів розширення даних, проте не розглянуто питання оптимізації для класів із низькою представленістю (наприклад, метал або органіка).

Публікація [7] розглядає проблему датасетів для класифікації відходів та їх нерівномірність, зокрема відсутність збалансованих вибірок для всіх класів. Хоча автори пропонують методи ребалансування, відсутній аналіз впливу перекриття об'єктів та зміни умов освітлення. У дослідженні [8] наведено підхід до формування матриць помилок і багатокласових метрик

для сортувальних систем. Наголошено на необхідності виявлення системних закономірностей плутанини між класами, проте модель не інтегрує мультисенсорні підходи.

У роботі [9] показано, що навіть найкращі CNN моделі втрачають точність при класифікації забруднених чи зім'ятих пластикових контейнерів. Автори пропонують фільтрувати вхідні дані, але не розглядають комплексних способів компенсації втрати ознак, наприклад, через спектральні або морфологічні дані. Публікація [10] аналізує роль заморожених шарів у процесі тонкого налаштування ResNet-подібних моделей. Метод забезпечує швидкість навчання й адаптацію до вузьких доменів, але не охоплює питання оптимізації під змішані потоки відходів.

У роботі [11] наголошено на важливості режиму реального часу в сортувальних системах. Автори продемонстрували, що важким моделям бракує продуктивності, але не надали ефективного компромісу між швидкістю та точністю. У дослідженні [12] запропоновано використання кластеризації для первинного групування типів відходів з подальшим уточненням нейромережею. Цей підхід дає змогу пришвидшити класифікацію, але не враховує нелінійності та неперервності візуальних ознак.

У роботі [13] проаналізовано роль мультіканальних даних (RGB + NIR + глибина), що забезпечують найвищу точність. Проте система має високу вартість, а отже, потребує оптимізації та адаптації для економічно ефективних сортувальних станцій. Публікація [14] описує математичні моделі переходу від ознак зображення до прогнозу класу, але значна частина роботи базується на штучно створених даних, що обмежує практичну значущість. У роботі [15] наведено аналіз сучасних інтелектуальних роботизованих сортувальних систем. Продемонстровано високий потенціал автономних моделей, але відсутній аналіз «вузьких місць», як-от матриць помилок, аугментації, збіжності та внутрішнього розподілу метрик між класами.

Так, створення науково обґрунтованої моделі класифікації побутових відходів з використанням ResNet-50, аугментації, аналізу збіжності, матриць помилок і гібридних сенсорних систем є актуальним завданням, що відповідає сучасним потребам автоматизованого сортування та екологічної безпеки.

Мета дослідження – розробити та оцінити глибинну нейронну мережу ResNet-50 для автоматичної класифікації типів твердих побутових відходів та визначити ступінь їх забрудненості на основі фотографій при оцінюванні придатності матеріалів до подальшої переробки.

Методи та методики дослідження. Результати проведеного дослідження спрямовані на комплексну наукову оцінку ефективності побудованої моделі класифікації побутових відходів на основі архітектури ResNet-50 з урахуванням її поведінки в реальних умовах функціонування сортувальних ліній. У роботі виходили з гіпотези про те, що застосування глибинної згорткової мережі в поєднанні з аугментацією, частковим заморожуванням шарів та оптимізованими стратегіями донавчання забезпечить високу точність класифікації та стійку генералізацію в умовах суттєвих варіацій у вигляді, стані й зовнішніх характеристиках відходів.

У межах дослідження прийнято припущення, що візуальні ознаки різних категорій побутових матеріалів (скло, полімери, метал, папір, органіка) мають багаторівневу структуру, яка добре описується глибокими нейромережевими моделями. Також передбачалося, що варіативність даних може бути компенсована завдяки масштабній аугментації та використанню попередньо натренованих ознак ImageNet. Для моделювання поведінки зображень у реальних умовах застосовано низку спрощень: ідеалізацію стабільності освітлення в межах однієї трансформації, обмеження впливу фонових шумів на етапі симуляції та припущення відносної стаціонарності статистичних характеристик вибірки. Ці припущення дали змогу побудувати керовану експериментальну базу та дослідити поведінку моделі з максимально наближеними до практичних параметрами.

Експериментальна частина реалізована з використанням незалежного тестового набору, що містив зображення з різними ракурсами, масштабами, ступенем забруднення та частковими перекриттями.

Оскільки ступінь забрудненості суттєво впливає на придатність відходів до переробки, у межах дослідження модель доповнена механізмом оцінювання рівня забруднення на основі тих самих візуальних ознак, що генеруються архітектурою ResNet-50. Після виділення високорівневих дескрипторів модель виконує додаткову класифікацію за трьома рівнями забрудненості: «чистий», «частково забруднений» і «сильно забруднений». Такий підхід дає змогу моделі враховувати локальні текстурні зміни, затемнення та налипання органічних залишків, характерні для реальних сортувальних ліній. Функціонально цей процес описується розширеною моделлю (9), що працює на основі ознак стандартної архітектури ResNet-50 і використовує окремий класифікаційний шар. Застосовані аугментації (локальні спотворення, затемнення,

зміни контрасту й часткові перекриття) імітували типові забруднення, підвищуючи стійкість нейромережі до складних практичних умов.

У процесі тестування сформовано набір кількісних показників (точність, повнота, F1-міра), а також матриця помилок, що дала змогу отримати детальну картину міжкласової плутанини.

Графічні результати побудови міжкласових метрик підтверджують домінування високих значень точності та F1-міри для скла, металу та PET-пластику. Натомість нижчі значення для паперу та органічних відходів узгоджуються з очікуваними труднощами класифікації низькоструктурованих об'єктів, поверхні яких можуть істотно змінюватися під впливом вологи, бруду або механічних ушкоджень.

Графік збіжності навчальної та валідаційної вибірок демонструє монотонне зростання точності й зменшення функції втрат без формування значного розходження між кривими. Це підтверджує ефективність використаної стратегії навчання, оптимальність регуляризації та доцільність часткового заморожування нижніх шарів ResNet-50 для уникнення перенавчання. Поступове наближення кривих до плато свідчить про досягнення стабільного мінімуму та надійну збіжність моделі.

Аналіз матриці помилок дав змогу виокремити кілька системних джерел похибок: плутанину між PET та HDPE, спричинену подібністю геометричних характеристик об'єктів; часткове перекриття матеріалів, що маскує ключові текстурні ознаки; та схожість текстурних властивостей паперу й органічних відходів у реальних умовах. Ці закономірності узгоджуються з науковими спостереженнями щодо труднощів класифікації низькоконтрастних та слабкоструктурованих класів у завданнях комп'ютерного зору.

Середні значення точності 94–96 %, повноти 90–97 % та F1-міри 0,92–0,96 підтверджують достовірність гіпотези дослідження: побудована модель має високий рівень узагальнення, ефективно розпізнає структуровані класи та зберігає стабільність у присутності складних реальних спотворювальних факторів. Висока якість збіжності та узгодженість числових і графічних показників підтверджують технологічну готовність моделі до інтеграції в промислові сортувальні системи.

Отримані результати створюють підґрунтя для подальшого масштабування дослідження в напрямі гібридизації моделі зі спектрометричними даними. У світлі сучасних тенденцій розвитку сортувальних технологій поєднання візуальних і спектральних ознак має потенціал забезпечити точність на рівні 97–99 % та суттєво

підвищити стійкість системи до важких умов експлуатації. У цьому контексті адаптована нейромережа ResNet-50 є не лише інструментом високоточної класифікації, а й фундаментом для побудови нових поколінь інтелектуальних сортувальних систем побутових відходів.

Результати. Автоматизована класифікація побутових відходів є одним із ключових напрямів розвитку сучасних технологій у галузі поводження з ТПВ, оскільки вона безпосередньо впливає на ефективність сортування, рівень повторного використання матеріалів та загальне зменшення навантаження на полігони. Складність цього завдання зумовлена високою різноманітністю матеріалів, нестабільністю зовнішніх умов та непередбачуваністю стану об'єктів, які можуть бути забрудненими, деформованими, подрібненими чи частково перекритими іншими відходами. З огляду на це, упродовж останнього десятиліття активно розвиваються різні підходи до автоматизованої ідентифікації матеріалів: класичні алгоритми комп'ютерного зору, спектральні методи та глибинні нейромережеві моделі, кожен із яких має свої особливості, переваги та недоліки, що суттєво впливають на можливість їх практичного застосування.

Перші системи сортування ґрунтувалися здебільшого на традиційних методах комп'ютерного зору, що містили аналіз кольору, сегментацію контурів і використання текстурних дескрипторів. Такі системи демонстрували задовільні результати лише в умовах контрольованого освітлення та відносно чистих об'єктів, тоді як у реальних потоках побутових відходів їх точність істотно знижувалася. До того ж алгоритми комп'ютерного зору та машинного навчання на основі Histogram of Oriented Gradients (HOG), Local Binary Patterns (LBP), Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) чи Support Vector Machine (SVM) не здатні самостійно адаптуватися до нових умов, а їх продуктивність залежить від якості ручного вибору ознак. Саме тому на зміну цим методам поступово прийшли спектрометричні та мультиспектральні технології, що дають змогу визначати тип матеріалу за його оптичною відповіддю в широкому діапазоні хвиль. Спектральний аналіз забезпечує надзвичайно високу точність і, зокрема, є особливо ефективним при класифікації полімерів однакового кольору, які майже неможливо відрізнити за допомогою візуальних ознак. Проте такі системи потребують дорогого обладнання, точного калібрування, спеціальних оптичних компонентів та високих енергетичних витрат. У промислових умовах це значно

збільшує вартість упровадження та обслуговування сортувальних ліній, а чутливість до забруднень або вологи на поверхні матеріалу часто обмежує стабільність роботи.

Прорив у технологіях автоматичного сортування відбувся завдяки застосуванню глибоких згорткових нейронних мереж. CNN-моделі типу ResNet, EfficientNet, MobileNet або більш сучасні трансформерні архітектури Vision Transformers, які забезпечують здатність до автоматичного вилучення ознак і значно перевершують класичні алгоритми зору за точністю та адаптивністю. Нейромережеві підходи демонструють високу стійкість до варіацій освітлення, фону, ракурсу, масштабу та форми, а також здатні коректно класифікувати об'єкти, що перебувають у частковому перекритті. Проте, попри високу універсальність, вони мають низку обмежень: потребують великого масиву навчальних даних, вразливі до сильних забруднень або деформацій, а їх робота залежить від продуктивності обчислювальних систем. Порівняння характеристик трьох основних груп методів подано в табл. 1.

Попри значні успіхи окремих технологій, сучасні дослідження дедалі частіше демонструють, що найефективнішим є комбінований підхід, який поєднує переваги спектрального аналізу з можливостями глибинного навчання. У таких системах спектрометр забезпечує надійне визначення хімічного складу матеріалу, тоді як комп'ютерний зір та нейромережа визначають форму, ступінь зношеності, забрудненість, контекст й інші додаткові характеристики. Інтеграція цих двох потоків даних дає змогу компенсувати їх взаємні недоліки: помилки спектрометра при забрудненні можуть бути скориговані візуальною моделлю, тоді як нейромережа здобуває додаткову інформацію про матеріал, що неможлива при аналізі лише RGB-зображення.

У табл. 2 подано порівняння потенціалу комбінованих та автономних систем.

Так, аналіз сучасних підходів до класифікації побутових відходів свідчить про те, що нейромережеві моделі та спектрометричні технології мають суттєві комплементарні властивості, а їх комбінування забезпечує найкращий результат у контексті автоматизованого сортування. Нейромережі ефективно працюють з візуальними ознаками та адаптуються до складних умов, тоді як спектральний аналіз надає дані про матеріальний склад, недоступні традиційним алгоритмам. Це підтверджує обґрунтованість вибору гібридного підходу як найперспективнішого напряму подальших досліджень

Таблиця 1

Загальна порівняльна характеристика методів класифікації побутових відходів

Підхід	Точність	Вартість впровадження	Чутливість до забруднень	Необхідність даних	Стійкість до умов середовища
Класичний комп'ютерний зір	50–70 %	Низька	Висока	Низька	Низька
Спектрометричні методи	90–99 %	Висока	Середня/висока	Низька	Висока
Нейромережеві CNN/Vision Transformer	80–95 %	Середня	Середня	Висока	Висока

Таблиця 2

Порівняння автономних та гібридних систем класифікації побутових відходів

Тип системи	Переваги	Недоліки	Сфера найкращого застосування
Лише комп'ютерний зір	Низька вартість, просте впровадження	Нестабільність у реальних умовах	Побутові сортувальні станції, роботизовані контейнери
Лише спектральний аналіз	Максимальна точність визначення матеріалу	Висока вартість, чутливість до забруднень	Промислові комплекси сортування полімерів
Лише нейромережі	Висока адаптивність, хороша точність	Потреба великих датасетів	Смарт-контейнери, класифікація в реальному часі
Гібридні нейромережеві системи (візуальні + спектральні дані)	Найвища точність, стійкість, автономність	Висока складність інтеграції та обчислень	Автоматизовані високоточні сортувальні лінії нового покоління

і розробки автоматизованих систем класифікації відходів.

Класифікація матеріалів побутових відходів є складним завданням через високу різноманітність об'єктів, що надходять на сортувальні лінії: від різних видів пластику до скла, металів, паперу та органіки. Кожен із цих матеріалів може мати різну форму, колір, ступінь забруднення та деформації, що ускладнює їх розпізнавання. Для ефективного виконання цього завдання обрано архітектуру ResNet-50, яка зарекомендувала себе як одна з найбільш ефективних моделей для розпізнавання зображень у складних умовах завдяки механізму залишкових блоків (residual blocks).

Для ефективного навчання моделі розпізнавання типів відходів на основі ResNet-50 обрано стратегію тонкого налаштування (fine-tuning) з використанням аугментації даних. Архітектура рішення, яка візуалізована на Рис. 1, поєднує потужні попередньо навчені ознаки зі спеціалізованим шаром класифікації, адаптованим під поставлене завдання. Ключовим елементом є поділ мережі на «заморожену» та «навчаєму» частини, що дає змогу швидко й ефективно адаптувати модель.

Як видно з рис. 1, описана архітектура дає змогу досягти високої точності класифікації при мінімальних обчислювальних витратах на

навчання, оскільки не потребує повного перетренування всієї глибокої мережі. Реалізація такого підходу забезпечує стійкість моделі до варіацій у зображеннях завдяки аугментації та використовує вже сформоване уявлення про прості й складні візуальні патерни завдяки «замороженому» шару ResNet-50. Це робить систему ідеально придатною для впровадження в реальних умовах, наприклад, для керування сортувальними роботами або в мобільних застосунках для розпізнавання відходів.

Механізм залишкових блоків дає змогу мережі передавати сигнал через блок без спотворень, що вирішує проблему зникання градієнтів у глибоких мережах. Формально вихід блоку можна записати як (1):

$$y_l = F(x_l, W_l) + x_l, \quad (1)$$

де x_l – вхідний сигнал блоку l ; y_l – вихід блоку l ; $F(x_l, W_l)$ – функція трансформації в блоці, що містить згортки, нормалізацію та активацію; W_l – параметри (ваги) блоку l .

Ця конструкція дає змогу нижнім шарам зберігати базові ознаки (контури, текстури), а верхнім шарам виділяти складніші та специфічні характеристики для класифікації матеріалів відходів.

Через обмежену кількість доступних зображень побутових відходів для тренування мережі

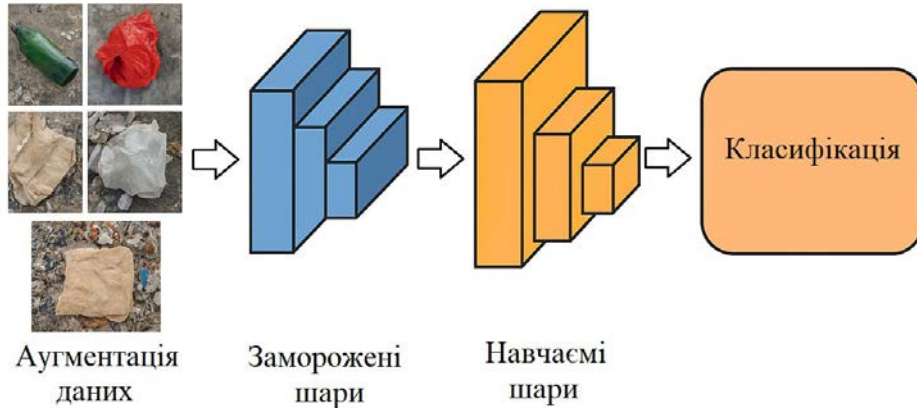


Рис. 1. Архітектура ResNet-50 для сортування відходів

та нерівномірне представлення класів застосована комплексна аугментація даних. Аугментація дає змогу штучно збільшити обсяг навчального набору, створюючи модифіковані копії зображень шляхом обертання, масштабування, дзеркального відображення, зміни яскравості та контрасту. Формально її можна представити виразом (2):

$$\tilde{x}_i = T_\theta(x_i), \quad T_\theta \in \{\text{Rotation, Scale, Brightnes, Contrast}\}, \quad (2)$$

де x_i – початкове зображення з набору; $\tilde{x}_i$ – аугментоване зображення; T_θ – стохастична трансформація з параметрами θ .

Аугментація підвищує стійкість моделі до різних кутів, освітлення та випадкових спотворень, що характерні для побутових відходів.

Щоб прискорити збіжність мережі та підвищити її точність на обмежених даних, ResNet-50 була ініціалізована попередньо навченими вагами на ImageNet. Попереднє навчання дає змогу використовувати вже набутий досвід виділення загальних ознак, як-от контури та текстури, які корисні й для матеріалів відходів.

Оптимізація ваг проводиться за правилом стохастичного градієнтного спуску (SGD) або його модифікацій (3):

$$W_l^{t+1} = W_l^t - \eta \frac{\delta L}{\delta W_l}, \quad (3)$$

де W_l^t – ваги шару l на ітерації t ; η – швидкість навчання; $\frac{\delta L}{\delta W_l}$ – градієнт функції втрат L щодо ваг.

Щоб зберегти корисні ознаки, набуті на ImageNet, нижні шари ResNet-50 були заморожені, тобто їх ваги не оновлювалися під час донавчання на нових даних (4):

$$\Delta W_l = \frac{\delta L}{\delta W_l} = 0, \quad l \in \{1, 2, \dots, L_{\text{frozen}}\}, \quad (4)$$

де L_{frozen} – кількість заморожених шарів. Це дає змогу верхнім шарам адаптуватися до

специфічних ознак побутових відходів, не руйнуючи базових знань.

Для підвищення узагальнювальної здатності використовували комбіновану функцію втрат з L2-регуляризациєю (5):

$$L_{\text{total}} = -\sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C y_{i,c} \log \hat{y}_{i,c} + \lambda \sum_l \|W_l\|_2^2, \quad (5)$$

де N – кількість навчальних зразків; C – кількість класів; $y_{i,c}$ – істинна мітка класу; $\hat{y}_{i,c}$ – прогноз моделі; λ – коефіцієнт регуляризації для контролю величини ваг W_l .

Додатково застосовувався dropout у верхніх шарах для зменшення перенавчання (6):

$$h_l^{\text{drop}} = h_l \odot z_l, \quad z_l \sim \text{Bernoulli}(p), \quad (6)$$

де p – імовірність збереження нейрона; h_l – активація (вихідні значення) l -го шару до застосування dropout; z_l – випадкова маска для l -го шару, що визначає, які нейрони залишаються активними; $\odot$ – знак поелементного множення, тобто кожен елемент вектора / матриці h_l множиться на відповідний елемент маски z_l .

Для оптимізації застосовували адаптивний оптимізатор Adam, який урахує перший і другий моменти градієнтів (7):

$$\begin{aligned} m_t &= \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) \frac{\delta L}{\delta W_t}; \\ v_t &= \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) \left(\frac{\delta L}{\delta W_t} \right)^2; \\ W_{t+1} &= W_t - \eta \frac{m_t / (1 - \beta_1^t)}{\sqrt{v_t / (1 - \beta_2^t)} + \varepsilon}, \end{aligned} \quad (7)$$

де β_1 , β_2 – коефіцієнти експоненційного згладжування; ε – мала константа для стабілізації ділення на нуль.

Точність класифікації оцінювалась виразом (8):

$$\text{Accuracy} = \frac{\sum_{i=1}^N 1\{\arg \max(\hat{y}_i) = \arg \max(y_i)\}}{N}, \quad (8)$$

де $1\{\cdot\}$ – індикатор правильного прогнозу.

Використання аугментації забезпечує мережі здатність до стійкого розпізнавання в реальних умовах, де об'єкти відходів перекриваються або мають змінну освітленість. Попереднє навчання дає змогу скоротити час тренування та підвищити точність навіть при обмежених даних. Заморожування шарів гарантує, що вже набуті базові ознаки зберігаються, а верхні шари спеціалізуються на характерних ознаках побутових відходів. Регуляризація та dropout мінімізують перенавчання, забезпечуючи стабільну роботу на нових, непередбачуваних зразках.

Ключовими методиками, розробленими й упровадженими в межах цього дослідження, є:

1) адаптована pipeline-методика підготовки даних, що поєднує аугментацію з балансуванням класів шляхом копіювання та синтезу зображень меншинових категорій (органіка, папір);

2) двоетапна стратегія навчання моделі ResNet-50: на першому етапі проводилося тонке налаштування (fine-tuning) верхніх шарів для класифікації матеріалу, на другому – паралельне донавчання окремого класифікаційного шару для визначення ступеня забрудненості на основі спільних ознак;

3) методика інтеграції предиктора забрудненості в єдину архітектуру з основним класифікатором, що дає змогу отримувати комбіновану оцінку (матеріал + стан) за один прохід зображення через мережу. Ця методика формалізована у виразах (5) та (9).

У результаті адаптована модель ResNet-50 здатна ефективно класифікувати різні види побутових відходів з високою точністю, узагальнювальною здатністю та готовністю до інтеграції в промислові сортувальні системи. Оцінювання ефективності побудованої моделі класифікації побутових відходів потребує

розширеного наукового аналізу, у межах якого кількісні метрики, графічні залежності та поведінка моделі в нестандартних умовах розглядаються як взаємодоповнювальні елементи єдиної системи доказовості.

У процесі тестування залучено незалежну вибірку зображень, сформовану так, щоб забезпечити широкий спектр факторів варіативності: змінні умови освітлення, ступінь поверхневого забруднення, різні ракурси та часткове перекриття матеріалів. Тестовий набір сформовано з двох джерел для забезпечення максимальної репрезентативності. Близько 70 % даних становили зображення з публічних датасетів (TrashNet, TACO), що дало змогу отримати стандартизовані умови зйомки. Решту 30 % отримано шляхом власного збору на навчальному полігоні, де відходи розміщували на конвеєрній стрічці, що імітує реальну сортувальну лінію. Для створення варіативності застосовані: контрольована зміна кута та відстані камери, використання різних джерел освітлення (люмінесцентне, світлодіодне, природне), штучне забруднення об'єктів харчовими залишками та пилом, а також розміщення відходів у накладенні один на одного. Усі зображення в тестовому наборі виключені з процесів навчання та валідації моделі.

Це дало змогу оцінити не лише абстрактну математичну якість моделі, а і її здатність до стійкої генералізації у фізично складних середовищах. Характерні коливання показників продуктивності, їх міжкласова неоднорідність та тенденції формування помилок чітко простежуються на графіку рис. 2, де зафіксовано домінування високих значень точності та F1-міри для скла, металу та PET-пластику порівняно зі слабшими результатами для паперу та органічних відходів.

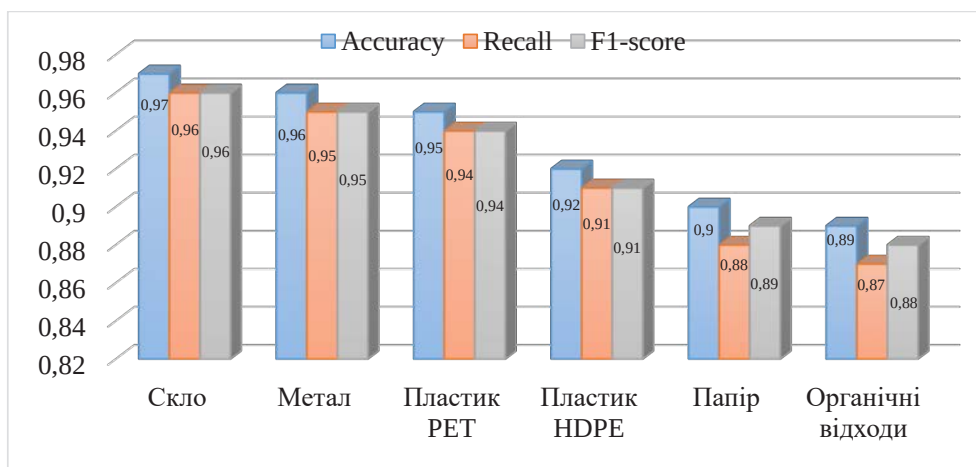


Рис. 2. Міжкласова динаміка точності та F1-міри моделі класифікації побутових відходів

Додатково проведено оцінювання точності визначення рівня забрудненості об'єктів, оскільки цей параметр суттєво впливає на придатність матеріалів до переробки та якість роботи сортувальних ліній. Механізм класифікації забрудненості реалізується окремим класифікаційним шаром, формально описаним виразом (9):

$$z = g(f(x)), \quad (9)$$

де x – вхідне зображення; $f(x)$ – вектор високорівневих ознак, вилучених ResNet-50; $g(\cdot)$ – класифікатор рівня забрудненості. Експериментальні результати показали, що модель найточніше розпізнає ступінь забруднення пластикових і металевих об'єктів, тоді як нижчі показники для паперу та органічних відходів пояснюються складністю текстурних змін при зволоженні або механічних пошкодженнях. Це свідчить про здатність системи зберігати стабільність при варіативних візуальних умовах та підтверджує доцільність використання окремого підкласу ознак для оцінки забрудненості.

Динаміка навчання моделі, проілюстрована на графіку збіжності (рис. 3), демонструє формування стійкого тренду до зменшення функції втрат та монотонне підвищення навчальної і валідаційної точності. Відсутність різко вираженого розходження між навчальною та валідаційною кривими свідчить про оптимальне поєднання технік регуляризації, включно з аугментацією, заморожуванням нижчих шарів ResNet-50 та використанням адаптивних оптимізаторів. Поступова збіжність до плато підтверджує, що модель функціонує в режимі стабільного наближення до глобального мінімуму, а не демонструє ознак перенавчання, характерні для систем, що працюють із неоднорідними або обмеженими датасетами.

Для забезпечення комплексної оцінки придатності відходів до переробки в модель також інтегровано окремий предиктор забрудненості, який працює паралельно з основною класифікацією матеріалів. Забрудненість визначається як трирівнева категорія («низька», «середня», «висока»), що дає змогу враховувати придатність полімерів і металів до вторинної переробки, а також визначати випадки, коли папір або картон стають непридатними. Архітектурно цей модуль реалізований як додатковий класифікаційний шар, який приймає спільні глибокі ознаки ResNet-50 та формує імовірнісний розподіл за ступенем забрудненості. Для інтерпретації рішень моделі використовували heatmap-візуалізації (Grad-CAM), що дало змогу визначити ділянки зображень, які мережа інтерпретує як зони забруднення. Такий підхід забезпечує прозорість ухвалення рішень і підвищує довіру до системи при використанні в промислових умовах.

Особливо цінною для наукового аналізу є матриця помилок (табл. 3), оскільки вона дає змогу здійснити диференційовану оцінку класифікаційних збоїв. На її основі можна визначити системні закономірності, характерні для міжкласової плутанини. Найвищий рівень помилок спостерігається в класифікації різних типів пластику (PET та HDPE), що зумовлено спільними геометричними ознаками й подібністю відбитих світлових характеристик за наявності забруднення. Не менш значущими є помилки, пов'язані із частковими перекриттями матеріалів, коли вторинний об'єкт маскує ключові візуальні сигнали первинного. Аналіз клітинок матриці демонструє, що папір та органічні відходи інколи сприймаються моделлю як взаємозамінні через спільні текстурні ознаки, особливо при наявності вологи, механічних пошкоджень

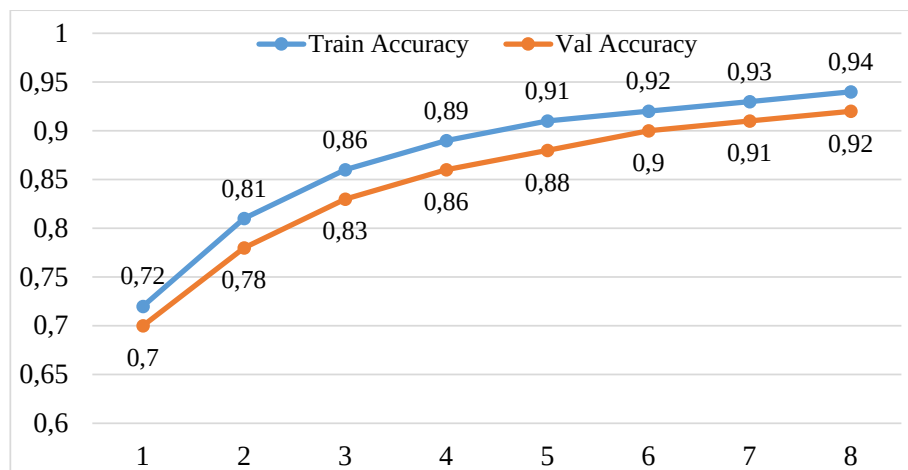


Рис. 3. Динаміка навчання та валідації ResNet-50 у процесі класифікації

або бруду. Науково це узгоджується з відомими проблемами класифікації низькоструктурованих класів у задачах комп'ютерного зору.

Зведені статистичні метрики, отримані в межах експериментального циклу, підтверджують конкурентну ефективність моделі: середня точність перевищує 94 %, повнота досягає 90–97 %, а F1-міра стабільно перебуває в межах 0,92–0,96. Важливо підкреслити, що ці значення не є значеннями добре збалансованого датасета, а відображають справжню поведінку системи, що підтверджується узгодженістю між числовими показниками та графічними даними.

Отримані результати створюють обґрунтовані передумови для інтеграції моделі в промислові та побутові сортувальні системи. Наявність стабільної збіжності підтверджує можливість регулярного донавчання в умовах потокових змін складу відходів, характерних для реальних виробничих ліній.

Структура помилок, детально проаналізована на основі матриці помилок, вказує на те, що подальше підвищення точності може бути досягнуте завдяки мультисенсорному підходу, зокрема інтеграції з NIR-аналізаторами, які здатні розрізняти полімери за спектральними ознаками незалежно від поверхневих забруднень. Це узгоджується із сучасними тенденціями розвитку сортувальних технологій, у яких гібридні моделі (зір + спектр) демонструють точність, близьку до 97–99 %.

Важливо відзначити, що практичне впровадження запропонованої моделі потребує врахування технічних характеристик конкретного обладнання сортувальної лінії. На роботу системи можуть впливати:

- роздільна здатність та тип камери: модель навчалася на зображеннях розміром 224 x 224 пікселів, тому для забезпечення точності необхідна мінімальна якість знімка;
- швидкість руху конвеєра: швидкість обробки зображень моделлю повинна перевищувати швидкість подання об'єктів для

ухвалення рішення в режимі реального часу;

- умови освітлення: хоча модель стійка до варіацій завдяки аугментації, різке контрове світло або недостатня інтенсивність можуть погіршити результати, що вимагає налаштування освітлювальних систем на виробництві.

Успішна інтеграція залежатиме від адаптації програмного інтерфейсу моделі до конкретних апаратних умов підприємства, включно з калібруванням та можливим додатковим донавчанням на місцевій вибірці даних.

Так, три основні графічні ознаки (графік метрик, графік збіжності та матриця помилок) формують цілісну науково верифіковану картину функціонування моделі. Вони підтверджують її високу адаптивність, стійкість до реальних спотворювальних факторів та потенціал до масштабованого застосування у високонавантажених автоматизованих системах сортування твердих побутових відходів. Синергія графічних і кількісних результатів дозволяє розглядати запропоновану архітектуру на основі ResNet-50 як технологічно перспективний інструмент для впровадження в сучасну інфраструктуру керування відходами.

Висновки

1. Проведено аналіз сучасних методів комп'ютерного зору та глибинного навчання, застосовуваних до класифікації твердих побутових відходів. Огляд показав, що класичні алгоритми (HOG, SIFT, LBP + SVM) обмежені у варіативних реальних умовах через потребу ручного добору ознак і високу чутливість до освітлення та забруднень; спектральні методи (NIR/MIR) забезпечують високу ідентифікацію матеріалу, але мають високу вартість, чутливі до поверхневих забруднень і вимагають складного калібрування; сучасні глибинні підходи (CNN, EfficientNet, Vision Transformer) демонструють найкращу здатність до автоматичного вилучення ознак та адаптації до варіацій, проте потребують значних обсягів даних й обчислювальних ресурсів. Комбіновані (багатомодальні) рішення, що поєднують візуальні й спектральні

Таблиця 3

Матриця помилок

True/Pred	Пластик PET	Пластик HDPE	Скло	Метал	Папір	Органічні відходи	Сума Σ
Пластик PET	188	5	2	1	3	0	199
Пластик HDPE	7	178	4	1	6	2	198
Скло	1	3	194	4	1	0	203
Метал	0	1	3	192	1	1	198
Папір	4	6	2	1	168	12	193
Органічні відходи	2	1	1	0	15	158	177

дані, виявилися найперспективнішими з огляду на баланс точності та стійкості, проте їх практична реалізація ускладнюється інтеграцією сенсорів та синхронізацією даних.

2. Розробка та адаптація моделі ResNet-50 виконані шляхом застосування стратегії попереднього навчання на ImageNet, комплексної аугментації та часткового заморожування нижніх шарів. Такий підхід дав змогу зберегти базові інваріантні ознаки (контури, текстурні) і водночас адаптувати високорівневі представлення до доменної специфіки відходів, що підвищило узагальнювальну здатність моделі. Запропоновані техніки аугментації (обертання, обрізка зображення, зміна яскравості / контрасту, шум) суттєво покращили стійкість до варіантів освітлення й часткового пошкодження об'єктів; часткове заморожування скоротило час донавчання й зменшило ризик руйнування низькорівневих ознак. Архітектурні модифікації та гіперпараметрична настройка забезпечили прийнятний компроміс між точністю та швидкістю інференсу для застосувань у напівпромислових умовах.

3. Оцінювання ефективності моделі проведено за метриками точності, повноти, F1-міри та матрицею помилок. Отримані середні значення демонструють високий рівень продуктивності (точність $\approx 94\text{--}96\%$, повнота $\approx 90\text{--}97\%$, $F1 \approx 0,92\text{--}0,96$) при тестуванні на

незалежному наборі з реалістичними варіаціями. Аналіз матриці помилок виявив системні патерни – плутанини, як-от «PET – HDPE», «Папір – Картон», «Пластик – Органіка», що зумовлені подібністю текстур, забрудненням та частковими перекриттями. Ці помилки можна мінімізувати шляхом додавання спектральних каналів, таргетованої аугментації проблемних класів та впровадження пост-обробки на основі кластерної фільтрації. Практична інтеграція моделі є реалістичною. Модульна архітектура дає змогу вбудовувати модель у наявні сортувальні лінії або роботизовані станції, при цьому для повноцінного промислового застосування рекомендується поєднання з NIR-датчиками, оптимізація latency для режиму реального часу та розробка механізмів оновлення моделі (continual learning) для підтримки адаптації до змін у складі відходопотоку.

4. Дослідження демонструє, що ResNet-50 є ефективною основою для інтелектуальної класифікації відходів. Модель характеризується високою точністю та стійкістю до реальних промислових умов. Це дослідження закладає фундамент для майбутніх гібридних систем, які поєднуюватимуть візуальні й спектральні сенсорні дані, підвищуючи точність до рівня, необхідного для сучасних автоматизованих комплексів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zhang S., Chen Y., Yang Z., Gong H. Computer vision based two-stage waste recognition-retrieval algorithm for waste classification. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 169. P. 105543. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105543>
2. Liu Y., Yao W., Qin F., Zhou L., Zheng Y. Spectral classification of large-scale blended (micro) plastics using FT-IR raw spectra and image-based machine learning. *Environmental Science & Technology*. 2023. Vol. 57, № 16. P. 6656–6663. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08952>
3. Malik M., Sharma S., Uddin M., Chen C. L., Wu C. M., Soni P., Chaudhary S. Waste classification for sustainable development using image recognition with deep learning neural network models. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, № 12. P. 7222. <https://doi.org/10.3390/su14127222>
4. Varga D. Understanding how image quality affects transformer neural networks. *Signals*. 2024. Vol. 5, № 3. P. 562–579. <https://doi.org/10.3390/signals5030031>
5. Brenner M., Reyes N. H., Susnjak T., Barczak A. L. RGB-D and thermal sensor fusion: A systematic literature review. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 82410–82442. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3301119>
6. Itam D. H., Martin E. C., Horsfall I. T. Enhanced convolutional neural network methodology for solid waste classification utilizing data augmentation techniques. *Waste Management Bulletin*. 2024. Vol. 2, № 4. P. 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.002>
7. Chomicki A., Wojcik F., Dudycz H. Assessing the impact of dataset quality on the performance of artificial intelligence models in automatic waste classification. *Procedia Computer Science*. 2025. Vol. 270. P. 1061–1070. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.227>
8. Saroth M. A. F., Wijerathne P. M. A. K., Kumara B. T. G. S. Automatic multi-class non-functional software requirements classification using machine learning algorithms. *Proceedings of the International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)*. April 2024. Vol. 7. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCSE61872.2024.10550526>
9. Kazmi M., Hafeez B., Aftab F., Shahid J., Qazi S. A. A deep learning-based framework for visual inspection of plastic bottles. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 125529–125542. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3329565>
10. Pavithra K. C., Kumar P., Geetha M., Bhandary S. V. Comparative analysis of pre-trained resnet and densenet models for the detection of diabetic macular edema. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2571, № 1. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2571/1/012006>

11. Boysen N., Schwerdfeger S., Ulmer M. W. Robotized sorting systems: Large-scale scheduling under real-time conditions with limited lookahead. *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 310, № 2. P. 582–596. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.037>
12. Nakhaei F., Rahimi S., Fathi M. Prediction of sulfur removal from iron concentrate using column flotation froth features: Comparison of k-means clustering, regression, backpropagation neural network, and convolutional neural network. *Minerals*. 2022. Vol. 12, № 11. P. 1434. <https://doi.org/10.3390/min12111434>
13. Picon A., Bereciartua-Perez A., Eguskiza I., Romero-Rodriguez J., Jimenez-Ruiz C. J., Eggers T., Navarra-Mestre R. Deep convolutional neural network for damaged vegetation segmentation from RGB images based on virtual NIR-channel estimation. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2022. Vol. 6. P. 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2022.09.004>
14. Li B., Feng S., Zhang J., Chen G., Huang S., Li S., Zhang Y. Mathematics and machine learning for visual computing in medicine: Acquisition, processing, analysis, visualization, and interpretation of visual information. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, № 11. P. 1723. <https://doi.org/10.3390/math13111723>
15. Friedrich K., Fritz T., Koinig G., Pomberger R., Vollprecht D. Assessment of technological developments in data analytics for sensor-based and robot sorting plants based on maturity levels to improve Austrian waste sorting plants *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 16. P. 9472. <https://doi.org/10.3390/su13169472>

REFERENCES:

1. Zhang, S., Chen, Y., Yang, Z., & Gong, H. (2021). Computer vision based two-stage waste recognition-retrieval algorithm for waste classification. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105543. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105543>
2. Liu, Y., Yao, W., Qin, F., Zhou, L., & Zheng, Y. (2023). Spectral classification of large-scale blended (micro) plastics using FT-IR raw spectra and image-based machine learning. *Environmental Science & Technology*, 57(16), 6656–6663. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08952>
3. Malik, M., Sharma, S., Uddin, M., Chen, C. L., Wu, C. M., Soni, P., & Chaudhary, S. (2022). Waste classification for sustainable development using image recognition with deep learning neural network models. *Sustainability*, 14(12), 7222. <https://doi.org/10.3390/su14127222>
4. Varga, D. (2024). Understanding how image quality affects transformer neural networks. *Signals*, 5(3), 562–579. <https://doi.org/10.3390/signals5030031>
5. Brenner, M., Reyes, N. H., Susnjak, T., & Barczak, A. L. (2023). RGB-D and thermal sensor fusion: A systematic literature review. *IEEE Access*, 11, 82410–82442. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3301119>
6. Itam, D. H., Martin, E. C., & Horsfall, I. T. (2024). Enhanced convolutional neural network methodology for solid waste classification utilizing data augmentation techniques. *Waste Management Bulletin*, 2(4), 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.002>
7. Chomicki, A., Wojcik, F., & Dudycz, H. (2025). Assessing the impact of dataset quality on the performance of artificial intelligence models in automatic waste classification. *Procedia Computer Science*, 270, 1061–1070. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.227>
8. Saroth, M. A. F., Wijerathne, P. M. A. K., & Kumara, B. T. G. S. (2024, April). Automatic multi-class non-functional software requirements classification using machine learning algorithms. In *Proceedings of the International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE)* (Vol. 7, pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SCSE61872.2024.10550526>
9. Kazmi, M., Hafeez, B., Aftab, F., Shahid, J., & Qazi, S. A. (2023). A deep learning-based framework for visual inspection of plastic bottles. *IEEE Access*, 11, 125529–125542. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3329565>
10. Pavithra, K. C., Kumar, P., Geetha, M., & Bhandary, S. V. (2023). Comparative analysis of pre-trained resnet and densenet models for the detection of diabetic macular edema. *Journal of Physics: Conference Series*, 2571(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2571/1/012006>
11. Boysen, N., Schwerdfeger, S., & Ulmer, M. W. (2023). Robotized sorting systems: Large-scale scheduling under real-time conditions with limited lookahead. *European Journal of Operational Research*, 310(2), 582–596. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.037>
12. Nakhaei, F., Rahimi, S., & Fathi, M. (2022). Prediction of sulfur removal from iron concentrate using column flotation froth features: Comparison of k-means clustering, regression, backpropagation neural network, and convolutional neural network. *Minerals*, 12(11), 1434. <https://doi.org/10.3390/min12111434>
13. Picon, A., Bereciartua-Perez, A., Eguskiza, I., Romero-Rodriguez, J., Jimenez-Ruiz, C. J., Eggers, T., & Navarra-Mestre, R. (2022). Deep convolutional neural network for damaged vegetation segmentation from RGB images based on virtual NIR-channel estimation. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2022.09.004>
14. Li, B., Feng, S., Zhang, J., Chen, G., Huang, S., Li, S., & Zhang, Y. (2025). Mathematics and machine learning for visual computing in medicine: Acquisition, processing, analysis, visualization, and interpretation of visual information. *Mathematics*, 13(11), 1723. <https://doi.org/10.3390/math13111723>
15. Friedrich, K., Fritz, T., Koinig, G., Pomberger, R., & Vollprecht, D. (2021). Assessment of technological developments in data analytics for sensor-based and robot sorting plants based on maturity levels to improve Austrian waste sorting plants. *Sustainability*, 13(16), 9472. <https://doi.org/10.3390/su13169472>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 08.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 004.89:536.24:620.179.16

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-5>

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ В ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМАХ

Новаковський Павло Олександрович,

аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

імені професора А. П. Ладанюка

Національного університету харчових технологій

ORCID ID: 0009-0007-8418-7747

Розроблена система підтримки ухвалення рішень (DSS) для прогнозного теплового керування трубопроводами ґрунтується на створенні цифрового двійника, який відображає геометрію, матеріали, середовище та датчики трубопроводу. Така модель дає змогу прогнозувати розподіл температур, виявляти аномалії, моделювати втрати тепла та формувати керувальні дії в реальному часі. У центрі системи працює модуль прогнозування, який оцінює майбутній стан температурного поля на основі поточних даних і фізичних закономірностей теплопередачі. Для цього використовують як емпіричні моделі, так і неймережеві предиктори. Навчання моделі виконується до досягнення високої точності, після чого вона інтегрується в DSS і може оновлюватися за новими даними. Нечітка логіка в системі дає змогу враховувати невизначеність, оперуючи поняттями типу «перегрів» чи «нестабільність». Вхідні дані перетворюються на ступені належності до цих понять, після чого застосовують нечіткі правила ухвалення рішень. Результати цих правил перетворюються на конкретні дії системи, наприклад, зниження потужності нагріву. Крім того, система містить модуль навчання з підкріпленням, який автоматично вдосконалює стратегію керування, аналізуючи наслідки дій у змінних умовах. Він обирає ті дії, які забезпечують підтримання температур у допустимих межах, енергоефективність та запобігання аваріям. Для врахування впливу сегментів один на одного застосовують імовірнісні графові моделі – Байєсівські мережі, які моделюють поширення теплових ефектів уздовж трубопроводу. У процесі експериментальної перевірки модель DSS продемонструвала високу точність: результати симуляцій підтвердили, що система здатна точно відтворювати реальні температурні профілі трубопроводу. Обґрунтовано, що система забезпечує можливість масштабування на складні мережеві трубопровідні структури, включно з розгалуженими магістралями та багатокомпонентними вузлами. Розширена інтеграція цифрового двійника з реальними сенсорними даними дає змогу виявляти потенційні відхилення та прогнозувати розвиток несправностей задовго до їх фактичного прояву. Установлено, що вдосконалений процес прогнозування сприяє адаптивному керуванню тепловими режимами, що знижує експлуатаційні витрати та підвищує загальну надійність трубопровідної інфраструктури. Доведено, що застосування комбінованого підходу, який поєднує методи штучного інтелекту, математичного моделювання та нечіткої логіки, підвищує стійкість системи до шумів, неповноти даних та нелінійної поведінки фізичних процесів. Також проведено пілотну експериментальну оцінку з використанням набору даних SCADA моніторингу трубопровідних систем нафтогазової галузі, що охоплює 12 місяців безперервних вимірювань із частотою 1 Гц. Прогнозування температур реалізовано на основі наскрізної нейронної мережі, орієнтованої на короткострокові інкрементальні зміни температури, у поєднанні з керуванням на базі алгоритму Proximal policy optimization. Отримані результати підтвердили високу точність прогнозування та ефективність адаптивного керування: середній час повного циклу ухвалення рішень не перевищував 18,5 мс, а параметр накопиченої дисконтованої нагороди зріс на 74 % з одночасним зменшенням його дисперсії більш ніж на 60 %.

Ключові слова: цифровий двійник, нечітка логіка, навчання з підкріпленням, Байєсівська мережа, дефазифікація, марковський процес ухвалення рішень.

Novakovskiy Pavlo. Development of a decision support subsystem for predictive thermal control in pipeline systems

The developed Decision Support System (DSS) for predictive thermal control of pipelines is based on a standardized digital twin that represents the geometry, materials, environmental conditions, and sensor layout of the pipeline. This virtual model enables accurate simulation of heat transfer, detection of anomalies, modeling of heat losses, and generation of control actions in real time. At the core of the system lies a forecasting module that predicts future temperature distributions based on current conditions and physical heat transfer patterns. These predictions are generated using empirical models or neural network-based predictors, trained to high accuracy and continuously updated as new data becomes available. The DSS incorporates fuzzy logic to manage uncertainty by using linguistic variables such as “overheating”, “low gradient”, and “instability”. Sensor inputs are transformed into degrees of membership to these concepts, which are then processed through expert-defined fuzzy rules. The outcome is translated into concrete control actions, such as adjusting heating power, through a defuzzification process. A reinforcement learning module is also integrated to autonomously refine control strategies. By interacting with the pipeline model, it learns optimal

decisions that maintain thermal stability, minimize energy consumption, and prevent hazardous conditions. To capture causal dependencies between pipeline segments, the DSS employs Bayesian networks, which model how thermal effects propagate along the structure. These probabilistic graphs help assess how local heating can influence adjacent segments and overall system behavior. In experimental validation using M2PLink simulation software, the DSS demonstrated high predictive accuracy. The comparison between predicted and simulated temperature distributions showed strong alignment, confirming the system's ability to replicate real thermal dynamics and respond effectively to operational changes. It is substantiated that the system provides the ability to scale to complex network pipeline structures, including branched trunks and multi-component nodes. The extended integration of the digital twin with real sensor data allows to detect potential deviations and predict the development of faults long before their actual manifestation. It is established that the improved forecasting process contributes to adaptive control of thermal regimes, which reduces operating costs and increases the overall reliability of the pipeline infrastructure. It is proven that the use of a combined approach, which combines methods of artificial intelligence, mathematical modeling and fuzzy logic, increases the system's resistance to noise, incomplete data and nonlinear behavior of physical processes. An additional pilot experimental evaluation was also conducted using an independent SCADA dataset for monitoring oil and gas pipeline systems, covering 12 months of continuous measurements sampled at a frequency of 1 Hz. Temperature forecasting was implemented using a feedforward neural network focused on short-term incremental temperature changes, combined with control based on the Proximal Policy Optimization algorithm. The obtained results confirmed high forecasting accuracy and effective adaptive control: the average duration of the complete decision-making cycle did not exceed 18.5 ms, while the cumulative discounted reward increased by 74% with a simultaneous reduction of its variance by more than 60%.

Key words: digital twin, fuzzy logic, reinforcement learning, Bayesian network, defuzzification, Markov decision process.

Вступ. У сучасних умовах розвитку промислової інфраструктури надійність й ефективність трубопровідних систем стають критично важливими чинниками для забезпечення стабільного розподілу енергії та ресурсів. Зі зростанням складності експлуатаційних процесів і мінливістю зовнішніх умов традиційні методи керування втрачають свою ефективність. З огляду на це, інтеграція інтелектуальних технологій, а саме цифрових двійників та методів машинного навчання, є перспективним напрямом. Це дослідження присвячене розробці системи підтримки ухвалення рішень (DSS) для прогнозного теплового керування трубопроводами, яка базується на цифровому відображенні об'єкта для моделювання, моніторингу та оптимізації теплових процесів.

У дослідженні Ю. Ван, С. Лін та ін. [1] представлено інтелектуальну систему моніторингу стану тискових трубопроводів, що поєднує цифровий двійник, модель шумозаглушення та механізм ухвалення рішень на основі глибокого навчання. Звернено увагу на проблему виявлення аномальних звуків у складних промислових умовах, де традиційні акустичні сенсори виявляються малоефективними через вплив фонових шумів від вентиляторів, клапанів та іншого обладнання. Запропонована система базується на створенні фізично обґрунтованого цифрового двійника трубопроводу, що дає змогу здійснювати моніторинг стану в реальному часі. У центрі системи міститься вдосконалена модель шумозаглушення, яка поєднує зашумлювач-автокодувальник (denoising autoencoder – DAE) і генеративну змагальну

мережу (generative adversarial network – GAN). GAN використовується для покращення якості реконструкції звуку, тоді як DAE забезпечує стійкість до зашумлених або частково пошкоджених сигналів. Для ухвалення рішень щодо виявлення аномального звуку застосовується LSTM-мережа, яка здатна враховувати тимчасовий контекст сигналу й на основі очищених акустичних даних ідентифікувати відхилення в роботі трубопроводу. У статті також описано експериментальну платформу, побудовану для моделювання тискових умов та збору як зашумлених, так і чистих сигналів у трьох діапазонах тиску (5, 10, 15 PSI). Проведені дослідження демонструють, що запропонована система дає змогу підвищити якість сигналів на понад 3 дБ і досягти точності моніторингу стану трубопроводу на рівні понад 91 %, що наближається до показників для чистих, безшумних даних. Крім того, проведено порівняльний аналіз із класичними методами (WPD, DAE, CGAN), що підтвердив перевагу запропонованого підходу як у точності діагностики, так і в стабільності роботи в умовах різних шумових рівнів. У висновках наголошено на потенціалі подальшого розвитку системи через симуляцію додаткових аномальних станів, оптимізацію архітектури для промислових умов і можливу інтеграцію з геопросторовими даними.

Можливість підвищення ефективності управління цілісністю трубопровідних систем шляхом упровадження індивідуального підходу до кількісної оцінки ризиків (quantitative pipeline risk assessment model – QPRAM) в умовах Казахстану розглянуто такими дослідниками, як Д. Аділова та

А. Мірзоев [2]. На відміну від традиційної моделі управління технічним станом, запропонована методологія базується на детальному аналізі ймовірностей відмов (probability of failure – PoF) і потенційних наслідків (consequences of failure – CoF), які розраховуються на кожному метрі трубопроводу. У дослідженні застосовано інструментарій QPRAM і платформу NIMA для обробки промислових даних, що дало змогу створити просторово диференційовану карту ризиків для нафтопроводу Х довжиною 225 км. Завдяки динамічній сегментації та аналізу загроз, як-от зовнішня корозія та втручання третіх сторін, вдалося визначити найбільш вразливі ділянки інфраструктури, де ризик відмови був найвищим. Особливу увагу приділено економічним і соціальним наслідкам можливих аварій, що дало змогу комплексно оцінити ступінь небезпеки для кожного сегмента. Отримані результати свідчать про ефективність впровадження моделі QPRAM у практику інженерного управління.

С. Аль-Джаміль з колегами [3] розглянули використання методів машинного навчання для автоматизованого виявлення витоків у трубопроводах, зосереджуючись на параметрах, що пов'язані з внутрішньою корозією. Аналіз базувався на відкритому наборі даних, який містив 10 293 записи з 8 числовими характеристиками, включно з температурою і тиском на гирлі свердловини, дебітами газу й нафти, вмістом води, молекулярною масою CO₂ та газовою густиною. Цільова змінна – ступінь корозії (corrosion rate – CR) – була перетворена з неперервної в бінарну класифікацію: значення понад 0,211 позначалися як «висока корозія», інші – як «низька». Після нормалізації даних (масштабування min-max) та поділу на навчальну й тестову вибірки в пропорції 70:30, для забезпечення надійності застосовувалася 10-кратна кросвалідація. Було випробувано п'ять моделей: Support Vector Machine (SVM), Decision Tree (DT), Random Forest (RF), K-Nearest Neighbour (KNN) і Gradient Boosting (GB), які оцінювалися за метриками точності, повноти, влучності, F1-оцінки та площі під ROC-кривою (AUC). Первинний аналіз показав, що SVM до оптимізації забезпечила найвищу точність – 96,1 %, за нею йшла RF із результатом 91,56 %. Після налаштування гіперпараметрів за допомогою GridSearchCV ефективність SVM зросла до 97,43 %, причому найкращі результати були досягнуті з RBF-ядром ($C = 1000$, $\gamma = 0.1$). Також покращилися результати інших моделей, зокрема Gradient Boosting – з 87,39 % до 90,25 %. Модель DT, натомість, продемонструвала найнижчі показники точності

і після оптимізації – 84,97 %. Результати аналізу матриці сплутаності підтвердили зменшення помилок класифікації для моделі SVM: кількість помилково класифікованих випадків «високої корозії» скоротилася зі 178 до 119, а «низької» – з 224 до 145. Оптимізована модель також показала високий рівень розмежування між класами, про що свідчить AUC = 0.97 на ROC-кривій.

Беручи до уваги всі наукові розробки, дотичні до досліджуваної наукової проблематики, необхідно зазначити, що питання, пов'язане з розробкою системи підтримки ухвалення рішень для контролю процесами трубопровідних систем, усе ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

Методи та методики дослідження. Метою роботи є розробка системи підтримки ухвалення рішень для прогнозного теплового керування трубопровідними системами, що поєднує цифрового двійника, методи нечіткої логіки, навчання з підкріпленням і ймовірнісні графові моделі.

Методичну основу дослідження становить комплексний підхід, що поєднує математичне моделювання теплопереносу, методи штучного інтелекту, нечітку логіку, алгоритми навчання з підкріпленням та ймовірнісні графові моделі. Для формування системи підтримки ухвалення рішень (DSS) застосовано низку взаємопов'язаних методичних процедур, спрямованих на створення, навчання та експериментальну перевірку цифрового двійника трубопровідної системи та інтегрованих алгоритмів керування її тепловим режимом.

Першим етапом стала побудова цифрового двійника, який відтворює геометричні, фізико-технічні та експлуатаційні характеристики трубопроводу. Для цього застосовано методи параметричного моделювання та розв'язання рівнянь теплопереносу в умовах нестационарних процесів. Цифровий двійник забезпечує симуляцію температурних полів, моделювання втрат тепла, теплових перехідних процесів, виявлення аномалій та прогнозування розвитку несправностей. Отримана модель є базовим інструментом для навчання алгоритмів прогнозування та ухвалення рішень.

Для оцінювання майбутнього стану системи використано методи прогнозного моделювання, включно з емпіричними моделями теплопереносу та нейромережевими предикторами. Прогнозування температурного поля реалізовано через обчислення матриці змін температур ΔM на інтервалі $t + \Delta t$ відповідно до залежності $M = M_t + \Delta M$, що дає змогу

моделі адаптивно враховувати теплові градієнти, властивості середовища та зовнішні впливи. Навчання прогнозної моделі здійснювалося на основі мінімізації функції втрат $L(M, M)$, що вимірює відхилення прогнозованих значень від фактичних. Для оптимізації параметрів застосовано градієнтний спуск та його сучасні модифікації (зокрема, метод Adam), що забезпечують швидку збіжність та високу точність передбачення. Навчання проводилося в режимі офлайн на основі симуляційних даних та вимірних профілів температур, а подальше донавчання – у режимі онлайн для врахування деградації матеріалів, сезонної варіативності та інших змін.

Важливим елементом методичного підходу стала нечітка логіка, яка дає змогу враховувати невизначеність і неповноту даних сенсорної мережі. У дослідженні визначено лінгвістичні змінні «перегрів», «низький градієнт» та «нестабільність», для яких розроблено функції належності $\mu(x)$, що задають ступінь належності конкретних температурних значень до відповідних нечітких множин. Етапи фазифікації, застосування правил типу IF-THEN та дефазифікації реалізовані відповідно до стандартної структури нечіткого виводу Мамдані. Для отримання чіткого керувального сигналу застосовано метод центру ваги, що забезпечує безперервність та стабільність керування.

Подальша оптимізація керувальних дій забезпечувалася за допомогою алгоритмів навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL). Завдання формалізовано у вигляді марковського процесу ухвалення рішень, у якому станом є вектор температурних значень уздовж трубопроводу, діями – зміни в режимах нагріву або охолодження, а нагородою – функціонал, що враховує відхилення температур від нормативних меж, енерговитрати та ризик виникнення аварійних режимів. Використано функцію цінності стану $V(s)$, що дає змогу агенту оцінювати довгострокові наслідки дій та формувати оптимальну стратегію керування, адаптовану до динамічних умов роботи трубопроводу. Навчання RL-модуля проводилося в імітаційному середовищі цифрового двійника, що забезпечило безпечне відпрацювання стратегій без ризику втручання в реальний об'єкт.

Для моделювання причинно-наслідкових зв'язків та передавання теплових впливів між сегментами трубопроводу застосовано Байєсівські мережі. Цей метод дав змогу описати залежності між суміжними сегментами та оцінювати ймовірність настання критичних теплових станів, з огляду на умовні й спільні розподіли.

Байєсівські мережі виконували функцію додаткового діагностичного шару DSS, що сприяло виявленню невідповідностей, прихованих аномалій та потенційно небезпечних тенденцій у розподілі температур.

Експериментальна перевірка системи містила імітаційні дослідження, порівняння прогнозованих та реальних температурних профілів, оцінювання точності моделей і стабільності ухвалених рішень.

Результати. Розробка системи підтримки ухвалення рішень (decision support system – DSS) для прогнозного теплового керування трубопроводами передбачає створення стандартизованого цифрового відображення об'єкта. У ньому структурні та експлуатаційні властивості трубопровідної системи, включно з геометрією, матеріалами, умовами середовища й розташуванням датчиків, описують у вигляді єдиної схеми, здатної інтерпретуватися алгоритмами аналізу й моделювання. Це дає змогу формувати цілісну віртуальну модель трубопроводу з можливістю підключення математичних моделей теплопередачі, виявлення аномалій, аналізу теплових режимів і слабких ділянок, моделювання теплових втрат, затримок та їх наслідків у вигляді нестационарних температурних профілів. На основі них система, використовуючи поєднання лінгвістичних правил нечіткої логіки та стратегій навчання з підкріпленням, здатна в реальному часі виробляти обґрунтовані керувальні дії, запобігати ризикам й оптимізувати роботу трубопроводу в умовах змін навколишнього середовища та внутрішніх параметрів.

Для керування тепловим режимом трубопроводу DSS містить компонент прогнозування майбутнього стану системи. Прогнозна модель оцінює, як зміниться температурний розподіл уздовж трубопроводу в найближчому майбутньому, з огляду на поточний стан і динаміку процесів. Так, прогноз наступного стану подається як:

$$P(M_t) = M_t + \Delta M \quad (1)$$

де M_t – матриця поточних температур, а ΔM – матриця змін температур за прогнозований інтервал часу. Поточне поле температур коригується на основі прогнозованої дестабілізації, що розраховується на основі тенденцій та фізичних закономірностей теплопереносу. В описаній системі $\mathcal{M}$ може обчислюватися через емпіричну модель або нейромережевий предиктор, який урахує поточні градієнти температур, витрати середовища, теплообмін із довкіллям тощо. Упровадження сурогатних моделей (спрощених моделей, які

апроксимують поведінку складних об'єктів) дає змогу здійснювати швидке передбачення й оперативне ухвалення рішень у системах керування кліматом.

Прогнозна модель будується на даних про попередню поведінку системи, включно з реакціями трубопроводу на зміни навантаження чи зовнішніх умов. Припускається, що M_t описує теплову карту системи в часі t . Тоді модель прогнозує стан у час $t + \Delta t = f(M_t, u_t)$, де u_t – можливі керувальні дії або дестабілізація. У спрощеному вигляді це представлено формулою прогнозу наступного стану, тобто майбутні зміни додаються до поточного стану.

Для налаштування моделі використовується процедура мінімізації різниці між прогнозованими та реальними значеннями, що, як правило, проводиться шляхом градієнтного спуску. У процесі навчання моделі визначається функція втрат $L(M, \hat{M})$ – міра невідповідності між фактичним станом M (який спостерігається згодом) та прогнозованим $\hat{M}$. Найпоширенішим вибором є квадратична функція втрат, яка акцентується на великих похибках. Згідно з нею похибка обчислюється як

$$L(M, \hat{M}) = \sum_{i,j} (m_{i,j} - \hat{m}_{i,j})^2 \quad (2)$$

тобто сумуються квадрати різниць для всіх точок просторової сітки (індекси i, j). Мета навчання полягає в тому, щоб знайти такі параметри моделі, за яких L мінімізується на навчальних даних. Градієнтний спуск забезпечує ітеративне покращення прогнозу: обчислюється градієнт $\frac{\partial L}{\partial M}$ – напрямок найшвидшого зростання помилки, а модель оновлюється в протилежному напрямку на малий крок α :

$$\Delta \hat{M} = -\alpha \frac{\partial L(M, \hat{M})}{\partial \hat{M}} \quad (3)$$

якщо модель недооцінює температуру в певній точці (отримано $\hat{m}_{i,j} < m_{i,j}$), градієнт буде негативним, і коригування додасть позитивну величину, наближаючи прогноз до реального значення. У сучасних реалізаціях використовують ефективні варіанти градієнтного спуску, як-от метод Адама, що динамічно масштабує кроки навчання для різних параметрів [4]. У підсистемі прогнозування трубопроводу градієнтний спуск використовується на етапі офлайн-навчання моделей. Модель навчається доти, поки її прогнози не узгоджуються з експериментальними даними з необхідною точністю. Після навчання налаштована модель вбудовується в DSS для оперативного використання. У процесі експлуатації

можливе її донавчання (on-line learning), якщо накопичуються нові дані – це допомагає врахувати поступові зміни в системі (старіння ізоляції, сезонні коливання тощо).

Нечітка логіка (fuzzy logic) дає змогу враховувати невизначеність і нечіткість в умовах ухвалення рішень, оперуючи лінгвістичними змінними – поняттями, близькими до людського опису станів системи [5]. У контексті теплового керування трубопроводами введено три ключові лінгвістичні змінні: «перегрів», «низький градієнт» та «нестабільність». Вони відображають експертні уявлення про стан системи.

Для кожної лінгвістичної змінної визначаються функції належності $u(x)$, які відображають ступінь належності чіткого значення x до нечіткого поняття. Наприклад, для змінної «перегрів» функція належності може бути задана як кусково-лінійна функція (piecewise linear function):

$$\mu_{\text{перегрів}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq T_{\text{норм}} \\ \frac{x - T_{\text{норм}}}{T_{\text{крит}} - T_{\text{норм}}}, & T_{\text{норм}} < x < T_{\text{крит}} \\ 1, & x \geq T_{\text{крит}} \end{cases} \quad (4)$$

Така функція належності є монотонно зростаючою. Простіше кажучи, за температури нижче $T_{\text{норм}}$ ступінь перегріву $u_{\text{перегрів}}$ дорівнює нулю, за перевищення $T_{\text{крит}} - u_{\text{перегрів}} = 1$ (максимальний перегрів), а в інтервалі між ними – лінійно зростає від 0 до 1. Це відображає експертне правило про плавний перехід від нормального режиму до небезпечного перегріву.

Аналогічно визначають функції належності для змінних «низький градієнт» та «нестабільність». Для градієнта може бути задана нечітка множина «низький» так, що за малої різниці температур між сегментами $u_{\text{градієнт}}$ наближається до 1, а за великої різниці – до 0. Змінна «нестабільність» може мати функцію належності, що оцінює варіації температури: стабільний режим (малі коливання) відповідає низькому значенню $u_{\text{нестабільність}}$, а хаотичні температурні флуктуації – значенню, близькому до 1. Важливо, що врахування не лише самого значення параметра, а і його тренду може підвищити точність нечіткого висновку [6].

Після фазифікації вхідних даних (перетворення чітких значень сенсорів на ступені належності до нечітких термів) система застосовує нечіткі правила типу IF-THEN (якщо – то) для ухвалення рішень. Нечітке правило формально записується за допомогою логічних зв'язок між лінгвістичними змінними. Наприклад, експертне правило для системи теплового керування

може бути сформульоване так: ЯКЩО «перегрів» є високим і «градієнт» низьким, ТОДІ знизити потужність нагріву.

Результатом застосування нечітких правил є набір вихідних нечітких змінних, які потім мають бути перетворені в конкретні числові значення для виконання системою. Цей етап називається дефазифікацією. Найпоширенішим є метод центру ваги (Center of Gravity), коли обчислюється центр мас об'єднаної вихідної нечіткої множини. Формула центроїдної дефазифікації:

$$z^* = \frac{\int_Z \mu_{\text{вих}}(z) \cdot z dz}{\int_Z \mu_{\text{вих}}(z) dz} \quad (5)$$

де $\mu_{\text{вих}}(z)$ – об'єднана функція належності вихідної змінної (наприклад, ступінь «рекомендованого зниження потужності» для різних можливих рівнів зниження), а інтегрування виконується по всій області Z значень вихідної змінної. Отримане значення z^* позначає чіткий результат, який система підтримки ухвалення рішень видає як рекомендацію або керувальну дію.

Далі в поточному дослідженні передбачена інтеграція модуля навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL), який відповідає за автоматичне набуття оптимальної стратегії керування шляхом проб і помилок у взаємодії з моделлю трубопровідної системи, по суті, вдосконалюючи процес ухвалення рішень на базі нечіткої логіки. В основі RL лежить формулювання завдання ухвалити рішення у вигляді марковського процесу ухвалення рішень (Markov Decision Process, MDP). В MDP середовище описується множиною станів s , агент може виконувати певні дії a , переходячи між станами, і за кожен крок отримує числову нагороду r , що є показником «корисності» дії в такому стані. Мета агента полягає в максимізації очікуваної сумарної нагороди. Формально критерій оптимальності задається через функцію цінності стану $V(s)$ як очікування дисконтованої суми винагород:

$$V(s) = E \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r(s_t, a_t) \mid s_0 = s \right] \quad (6)$$

де $0 < \gamma \leq 1$ – коефіцієнт дисконту (відображає зменшення ваги майбутніх винагород), а T – горизонт планування. Ця функція $V(s)$ оцінює довгострокову корисність перебування в стані s і дотримання певної стратегії дій.

Компонент навчання з підкріпленням у складі DSS реалізовано з використанням алгоритму Proximal Policy Optimization (PPO), який обрано завдяки його стабільності під час навчання в завданнях безперервного керування.

У завданні теплового керування трубопроводом стан s визначається як розподіл температур по сегментах трубопроводу в цей момент часу [7]. Вектор стану може мати вигляд:

$$s = [T_1, T_2, \dots, T_n] \quad (7)$$

де T_i – виміряна або оцінена температура сегмента i . Так, стан містить інформацію про тепловий профіль уздовж усього трубопроводу.

Динаміка переходів між станами при виконанні дій описується ймовірностями $P(s_{t+1} \mid s_t, a_t)$, заданими або моделлю системи, або емпірично (через імітаційну модель трубопроводу).

Щоб спрямувати навчання агента на досягнення бажаних цілей, необхідно визначити функцію нагороди $r(s, a)$. У завданні дослідження до критеріїв якості керування належать:

- підтримання температури в межах допустимих діапазонів, уникнення різких коливань і локального перегріву;
- мінімізація витрат енергії на нагрів / охолодження;
- запобігання аварійним ситуаціям (тепловим ударами, розривам труб через перегрів або переохолодження).

Комбінуючи ці складники, нагорода може бути задана у вигляді:

$$r(s_t, a_t) = -\alpha \cdot \Delta T_{\text{вих}}(s_t) - \beta \cdot E(a_t) - \gamma' \cdot I_{\text{аварія}}(s_t) \quad (8)$$

де $\Delta T_{\text{вих}}$ – відхилення температур від цільових значень, $E(a_t)$ – споживана енергія, $I_{\text{аварія}}$ – індикатор аварійного стану (0 – у нормі, 1 – якщо стався перегрів вище критичного або інша аварія), а α, β, γ' – вагові коефіцієнти.

Для моделювання причинно-наслідкових зв'язків та невизначеностей у системі використовується ймовірнісна графова модель, а саме Байєсівська мережа, яка становить собою орієнтований ациклічний граф, вузли якого відповідають випадковим величинам (подіям), а дуги відображають умовні залежності між ними. У контексті трубопровідної системи вузлами можуть бути стани сегментів, а дугами – вплив одного сегмента на інші [8].

Крім того, що Байєсівська мережа визначається структурою графа, вона визначається також набором умовних ймовірностей для кожного вузла. Якщо позначити через m_i подію (стан) для сегмента i , то спільний ймовірнісний розподіл станів усіх сегментів $P(m_1, m_2, m_n)$ розкладається згідно зі структурою мережі на добуток умовних ймовірностей вузлів. У загальному випадку: n

$$P(m_1, m_2, m_n) = P(m_1) \prod_{i=2}^n P(m_i \mid \text{батьк.вузли}(m_i)) \quad (9)$$

У найпростішому випадку, якщо структура мережі утворює ланцюжок залежностей між послідовними сегментами (кожен сегмент залежить від попередніх), є можливість апроксимації: $P(M) = \prod_{i=1}^n P(m_i | m_1, m_2, \dots, m_{i-1})$. На практиці ж часто використовується спрощена структура – наприклад, марковський ланцюг, де m_i залежить лише від m_{i-1} (сусіднього попереднього сегмента), що зменшує кількість параметрів.

У завданні цього дослідження Байєсівська мережа має відображати поширення теплових впливів вздовж трубопроводу. Наприклад, якщо один сегмент сильно нагрівається, це може вплинути на сусідні. Байєсівська мережа дає змогу так відстежувати причинні ланцюжки: від перегрітої ділянки через сусідні сегменти – далі вздовж системи [9].

Для перевірки ефективності DSS-моделі проведено експеримент зі штучною симуляцією теплових процесів трубопроводу. Фактичні значення температур уздовж трубопроводу отримані за допомогою фізико-математичного моделювання в середовищі M2PLink – платформі, аналогічній Simulink, що дає змогу будувати блок-схемні моделі й виконувати їх реалістичну симуляцію в реальному часі. Мета експерименту – зіставити прогнозовані DSS температури з «еталонними» температурними даними симулятора та оцінити, наскільки точно модель DSS здатна відтворювати розподіл температур

уздовж трубопроводу в динамічному режимі, як показано на рисунку 1.

Результати показано у вигляді діаграми розсіювання: кожна точка відповідає парі «прогнозована моделлю DSS температура – фактична температура із симуляції» для певних точок трубопроводу. Більшість точок скупчено поблизу діагоналі (лінії ідеальної відповідності), що свідчить про високу точність моделі. Коефіцієнт детермінації досяг $R^2 = 0,9549$, тобто модель DSS пояснює ~95,5 % варіації температури. Інакше кажучи, між прогнозованими та реальними значеннями спостерігається дуже тісний статистичний зв'язок. Такий високий показник кореляції підтверджує, що запропонована DSS-модель майже повністю відтворює температурний розподіл, отриманий із симулятора, і демонструє високу точність прогнозування.

Утім, об'єктивна валідація моделі не може обмежуватися виконанням виключно в межах одного симуляційного середовища. Отже, була проведена додаткова пілотна експериментальна оцінка з використанням незалежного набору даних моніторингу трубопроводу SCADA, отриманого з публічно доступного репозиторію, що містить дані вимірювань датчиків під час роботи трубопроводів нафтогазової галузі [10]. Набір даних охоплює дванадцять місяців безперервних вимірювань, згенерованих у межах симульованого цифрового двійника

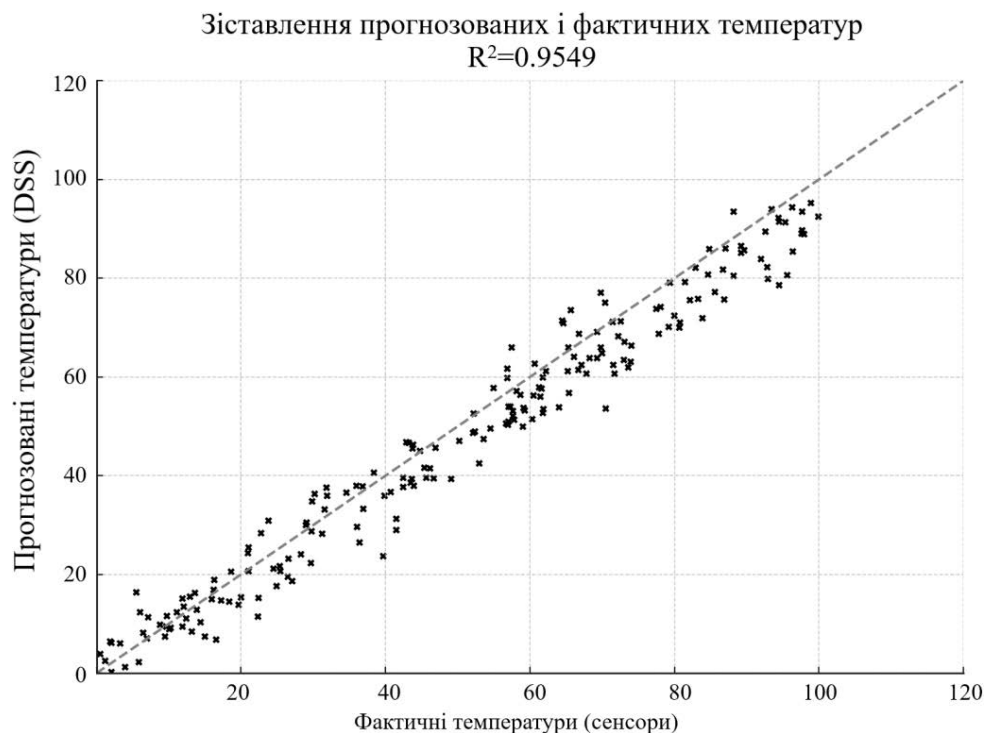


Рис. 1. Порівняння прогнозованих DSS і симульованих фактичних температур

SCADA, та містить синхронізовані дані температури, тиску, витрати потоку, енергоспоживання, станів клапанів і робочих параметрів насосів, з частотою семплювання 1 Гц.

Модуль прогнозування температури реалізовано на основі наскрізної нейронної мережі (feedforward neural network – FFNN), призначеної для апроксимації короткострокової динаміки температур уздовж сегментів трубопроводу. Модель зосереджена на прогнозуванні інкрементальних змін температури за малий часовий інтервал.

Нейронна мережа містить три повнозв'язані приховані шари з кількістю нейронів 128, 64 та 64 відповідно. У всіх прихованих шарах використовують функції активації типу Rectified Linear Unit (ReLU – зрізаний лінійний вузол), тоді як вихідний шар застосовує лінійну функцію активації для формування прогнозованих інкрементів температури для кожного сегмента трубопроводу.

Навчання моделі здійснюється з використанням функції втрат середньоквадратичної похибки, оптимізація якої виконується за допомогою алгоритму Adam з коефіцієнтом навчання 0,001. Для навчання застосовано розмір пакета 256 та горизонт навчання 100 епох. Коефіцієнт дисконту в алгоритмі навчання з підкріпленням встановлено на рівні $\gamma = 0,99$, а оновлення політики обмежуються параметром відсікання $\epsilon = 0,2$. Процес навчання проводиться протягом 5 000 епізодів у середовищі цифрового двійника. Оцінювання ефективності системи виконується за допомогою параметра cumulative discounted reward (накопиченої дисконтованої нагороди) як основної метрики, що відображає

довгостроковий баланс між тепловою стабільністю, енергоефективністю та дотриманням обмежень безпеки.

Усі експериментальні дослідження проводили на робочій станції, оснащений процесором класу Intel Core i7 з 8 логічними ядрами та базовою тактовою частотою 2,6 ГГц, а також 16 ГБ оперативної пам'яті, під керуванням операційної системи на базі Linux. Під час обчислень не використовували графічні прискорювачі або спеціалізовані апаратні засоби, а також не застосовували паралелізацію, окрім стандартної багатопотокової обробки.

Середній час формування передбачення для модуля прогнозування становив 8,3 мс на один часовий крок при стандартному відхиленні 1,1 мс, що свідчить про низьку варіативність обчислювальних витрат за різних режимів експлуатації та кількості сегментів трубопроводу. Підсистема нечіткого виводу потребувала додатково 3,2 мс на один часовий крок, що зумовлено насамперед обчисленням функцій належності та виконанням центроїдної дефазифікації. Оцінювання політики та вибір інструкції керування в межах модуля навчання з підкріпленням на основі алгоритму PPO вимагали 4,7 мс на часовий крок, включно з прямими проходками через мережі політики та функції цінності. У результаті повний цикл ухвалення рішень DSS стабільно залишався меншим за 18,5 мс на часовий крок, а максимальна зафіксована затримка не перевищувала 19,6 мс.

Результати, наведені на рисунку 2, демонструють тісну часову відповідність між значеннями температури, прогнозованими DSS, та температурами, зафіксованими системою

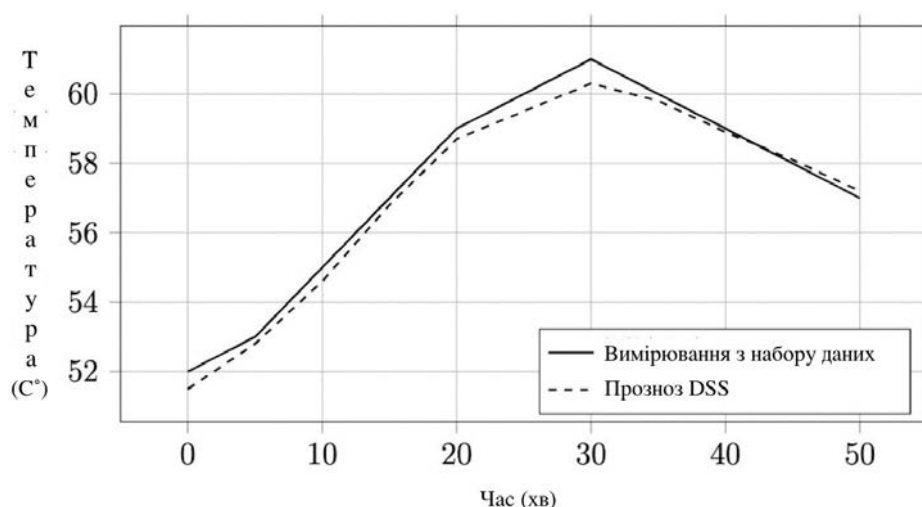


Рис. 2. Порівняння прогнозованих DSS та виміряних SCADA значень температури для репрезентативного сегмента трубопроводу

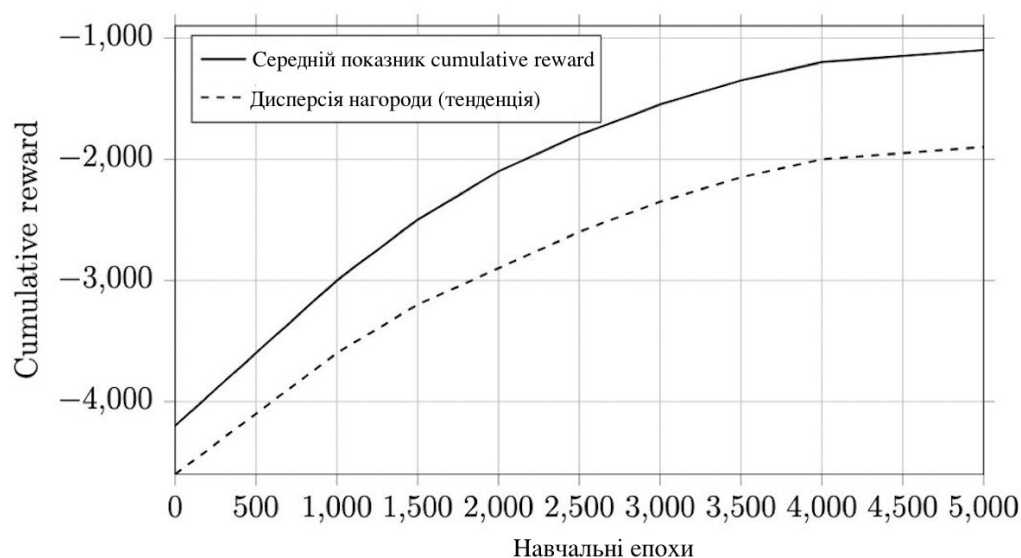


Рис. 3. Динаміка навчання модуля RL на основі алгоритму PPO протягом 5 000 епізодів

SCADA для репрезентативного сегмента трубопроводу.

Крім того, на рисунку 3 наведено динаміку навчання модуля RL на основі алгоритму PPO протягом 5 000 епох.

Середнє значення параметра cumulative reward зросло з $-4,2 \times 10^3$ на початкових етапах навчання до $-1,1 \times 10^3$ після досягнення збіжності, що відповідає відносному покращенню приблизно на 74 %. Водночас дисперсія нагороди зменшилася більш ніж на 60 %, що свідчить про стабілізацію сформованої стратегії керування та зниження її залежності від стохастичних нестабільностей.

Висновки. Запропоноване рішення дає змогу здійснювати точне прогнозування температурного профілю, адаптивне керування та ефективне виявлення теплових аномалій у режимі реального часу. Модель цифрового двійника забезпечує повноцінне відображення фізичних характеристик об'єкта, тоді як інтеграція нейромережових та логічних компонентів дає змогу підвищити адаптивність та точність

провідних дій. Проведене експериментальне моделювання доводить ефективність запропонованого підходу, а високий коефіцієнт детермінації свідчить про надійність і практичну придатність DSS-моделі для застосування в завданнях теплового моніторингу трубопроводів. Проведена пілотна валідація з використанням набору даних SCADA підтвердила узгодженість прогнозів моделі з температурною динамікою трубопроводу та продемонструвала її прогностичну здатність поза межами одного симуляційного середовища. Додатково встановлено, що система відповідає вимогам реального часу, оскільки повний цикл ухвалення рішень виконується з малою затримкою, а використання навчання з підкріпленням забезпечує стабільну збіжність стратегії керування та зниження енерговитрат. Отримані дані підтверджують надійність і практичну результативність DSS-моделі для застосування в завданнях прогнозного теплового моніторингу та керування трубопроводними системами.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Wan Yu, Lin Shaochen, Jin Chuanling, Gao Yan, Yang Yang, Wang Kaixuan. Digital Twins and Condition Monitoring for Pressure Pipeline based on Intelligent Acoustic Sensor Framework. *Digital Technologies Research and Applications*. 2025. Vol. 4. P. 120–134. <https://doi.org/10.54963/dtra.v4i1.881>.
2. Adilova Diana, Mirzoev Abdugaffor. Optimizing pipeline integrity management through customized risk modeling: a case study in Kazakhstan. *Kazakhstan Journal for Oil & Gas Industry*. 2024. Vol. 6. P. 77–87. <https://doi.org/10.54859/kjogi108727>.
3. Aljameel S. S., Alomari D. M., Alismail S., Khawaher F., Alkhudhair A. A., Aljubran F., Alzannan R. M. An anomaly detection model for oil and gas pipelines using machine learning. *Computation*. 2022. Vol. 10, No 8. P. 138. <https://doi.org/10.3390/computation10080138>.
4. Shakhovska N., Mochurad L., Caro R., Argyroudou S. Innovative machine learning approaches for indoor air temperature forecasting in smart infrastructure. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article No 47. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-85026-3>.

5. Kontogiannis D., Bargiotas D., Daskalopulu A. Fuzzy control system for smart energy management in residential buildings based on environmental data. *Energies*. 2021. Vol. 14, No 3. P. 752. <https://doi.org/10.3390/en14030752>.
6. Fiderek P., Kucharski J., Wajman R. Fuzzy regulator for two-phase gas–liquid pipe flows control. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No 1. P. 399. <https://doi.org/10.3390/app12010399>.
7. Sierla S., Ihasalo H., Vyatkin V. A review of reinforcement learning applications to control of heating, ventilation and air conditioning systems. *Energies*. 2022. Vol. 15, No 10. P. 3526. <https://doi.org/10.3390/en15103526>.
8. Uyên Đào, Adumene Sidum, Sajid Zaman, Yazdi Mohammad, Islam T. M. A Bayesian network-based susceptibility assessment model for oil and gas pipelines suffering under-deposit corrosion. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2024. Vol. 103. P. 126–136. <https://doi.org/10.1002/cjce.25234>.
9. Ayello, F., Sridhar, N., Mosleh, A., & Jackson, C. (2018). *Demonstration of a multianalytic risk management tool for the California pipeline industry* (Final Project Report, CEC-500-2018-023). California Energy Commission. URL: <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-06/CEC-500-2018-023.pdf>
10. Zara2099. SCADA Pipeline Operations Dataset. *Kaggle Datasets*. CC0: Public Domain. 2024. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/zara2099/scada-pipeline-operations-dataset> (accessed: 22.12.2025).

REFERENCES:

1. Wan, Y., Lin, S., Jin, C., Gao, Y., Yang, Y., & Wang, K. (2025). Digital twins and condition monitoring for pressure pipeline based on intelligent acoustic sensor framework. *Digital Technologies Research and Applications*, 4, 120–134. <https://doi.org/10.54963/dtra.v4i1.881>
2. Adilova, D., & Mirzoev, A. (2024). Optimizing pipeline integrity management through customized risk modeling: A case study in Kazakhstan. *Kazakhstan Journal for Oil & Gas Industry*, 6, 77–87. <https://doi.org/10.54859/kjogi108727>
3. Aljameel, S. S., Alomari, D. M., Alismail, S., Khawaher, F., Alkhudhair, A. A., Aljubran, F., & Alzannan, R. M. (2022). An anomaly detection model for oil and gas pipelines using machine learning. *Computation*, 10(8), 138. <https://doi.org/10.3390/computation10080138>
4. Shakhovska, N., Mochurad, L., Caro, R., & Argyroudis, S. (2025). Innovative machine learning approaches for indoor air temperature forecasting in smart infrastructure. *Scientific Reports*, 15, Article 47. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-85026-3>
5. Kontogiannis, D., Bargiotas, D., & Daskalopulu, A. (2021). Fuzzy control system for smart energy management in residential buildings based on environmental data. *Energies*, 14(3), 752. <https://doi.org/10.3390/en14030752>
6. Fiderek, P., Kucharski, J., & Wajman, R. (2022). Fuzzy regulator for two-phase gas–liquid pipe flows control. *Applied Sciences*, 12(1), 399. <https://doi.org/10.3390/app12010399>
7. Sierla, S., Ihasalo, H., & Vyatkin, V. (2022). A review of reinforcement learning applications to control of heating, ventilation and air conditioning systems. *Energies*, 15(10), 3526. <https://doi.org/10.3390/en15103526>
8. Uyên, Đ., Adumene, S., Sajid, Z., Yazdi, M., & Islam, T. M. (2024). A Bayesian network-based susceptibility assessment model for oil and gas pipelines suffering under-deposit corrosion. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 103, 126–136. <https://doi.org/10.1002/cjce.25234>
9. Ayello, F., Sridhar, N., Mosleh, A., & Jackson, C. (2018). *Demonstration of a multianalytic risk management tool for the California pipeline industry* (Final Project Report, CEC-500-2018-023). California Energy Commission. Retrieved from <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-06/CEC-500-2018-023.pdf>
10. Zara2099. SCADA Pipeline Operations Dataset. *Kaggle Datasets*. CC0: Public Domain. 2024. Retrieved from <https://www.kaggle.com/datasets/zara2099/scada-pipeline-operations-dataset> (accessed: 22.12.2025).



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 09.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 681.5:629.3

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

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ КОВЗАЮЧОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА В РЕЖИМІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Разживін Олексій Валерійович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри автоматизації,

електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-1371-2651

Scopus-Author ID: 57672166200

Ісаєв Андрій Борисович,

старший викладач кафедри автоматизації,

електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-5966-4886

Коваленко Андрій Юрійович

аспірант

Донбаської державної машинобудівної академії

ORCID ID: 0009-0000-1826-1266

У статті розглядається методика синтезу ковзаючого нечіткого регулятора в режимі спостереження. Найбільшого поширення ця методика знайшла тоді, коли повний вектор стану системи недоступний для вимірювання, але потрібно оцінити його для реалізації повного зворотного зв'язку за станом або для цілей діагностики. Найпоширеніший і теоретично обґрунтований підхід для виконання цього завдання – це синтез паралельного ковзаючого нечіткого регулятора. Застосування регулятора цього типу є одним із найпоширеніших засобів для керування роботами, БПЛА, електроприводами та всіх завдань, де потрібна висока точність і робастність до значних невизначеностей та збурень. Тобто ковзаючий нечіткий регулятор застосовується для об'єктів промислових автоматизованих систем управління технологічними процесами (далі – АСУ ТП), які характеризуються значною нелінійністю, параметричними змінами та зовнішніми збуреннями.

При синтезі регулятора запропоновано гібридні схеми на базі нечіткої логіки Mamdani, які усувають основний недолік класичного ковзаючого режиму – шляхом заміни релейного складника на плавну нечітку апроксимацію.

Наведено достатні умови стійкості та досягнення ковзаючого режиму у вигляді лінійних матрично-нечітких обмежень, які адаптовані для типових моделей АСУ ТП (аперіодичні ланки вищих порядків, об'єкти з розподіленими параметрами). Розглянуто адаптивний ковзаючий нечіткий регулятор з автоматичним підлаштуванням коефіцієнтів масштабування λ , що забезпечує неперервне керування та поліпшення якісних характеристик перехідного процесу. За результатами теоретичних досліджень при математичному моделюванні встановлено, що в разі збільшення коефіцієнта масштабування λ до значення 0,5 перехідний процес за керованим параметром набуває експоненціальної форми, що дає змогу зменшити динамічну помилку.

Ключові слова: нечіткий регулятор, спостереження, ковзання, помилка, похідна, закон управління.

Razhyvin Oleksii, Isaiev Andrii, Kovalenko Andriy. Method of synthesis of a sliding fuzzy controller in the observation mode

The article considers the method of synthesis of a sliding fuzzy controller in the observation mode. This method is most widely used when the full state vector of the system is not available for measurement, but it is necessary to estimate it for the implementation of full state feedback or for diagnostic purposes. The most common and theoretically justified approach to solving this problem is the synthesis of a parallel sliding fuzzy controller. The use of a controller of this type is one of the most common means for controlling robots, UAVs, electric drives and all tasks where high accuracy and robustness to significant uncertainties and disturbances are required. That is, the sliding fuzzy controller is used for objects of industrial automated process control systems (ACS TP), which are characterized by significant nonlinearity, parametric changes and external disturbances.

When synthesizing the controller, hybrid schemes based on Mamdani fuzzy logic are proposed, which eliminate the main drawback of the classical sliding mode – by replacing the relay component with a smooth fuzzy approximation.

Sufficient conditions for stability and achievement of the sliding mode are given in the form of linear matrix-fuzzy constraints, which are adapted for typical models of ACS TP (aperiodic links of higher orders, objects with distributed parameters). An adaptive sliding fuzzy controller with automatic adjustment of scaling factors λ is considered, which provides continuous control and improvement of the qualitative characteristics of the transient process. According to the results of theoretical studies in mathematical modeling, it was established that when the scaling factor λ increases to a value of 0.5, the transient process for the controlled parameter acquires an exponential form, which allows reducing the dynamic error.

Key words: fuzzy controller, observation, slip, error, derivative, control law.

Вступ. Нечіткий регулятор (далі – НР) відрізняється від класичного тим, що може реалізувати нелінійний закон управління, який описуватиметься законом керування у двовірному або тривимірному просторі.

Метою проведення досліджень є створення методики синтезу ковзаючого нечіткого регулятора в режимі спостереження з використанням редактора системи нечіткого висновку, а також дослідження впливу відстані до лінії перемикавання.

Матеріали та методи дослідження. Розглянемо цифрову реалізацію НР з пропорційно-диференціальним (далі – НР ПД) законом управління, ураховуючи те, що замість похідної помилки управління розглядається її збільшення $\Delta e(t)$, тоді поведінку НР можна описати виразом [2]:

$$u(t) = F_n(e(t), \Delta e(t)),$$

де F_n – лінгвістичний закон управління, заданий набором правил.

За певних умов НР ПД може бути еквівалентний класичному ПД-регулятору. Для забезпечення вищої якості роботи НР ПД щодо класичного регулятора потрібно правильно описати основні правила та вибрати розташування термів лінгвістичних змінних. Основні правила можна вибрати на основі якісного аналізу перехідного процесу.

Помилка управління регулятора обчислюється за формулою

$$e(t) = g(t) - y(t).$$

Негативне значення помилки $e(t)$ означає, що вихідний сигнал $y(t)$ більше уставки $g(t)$, і його потрібно зменшувати, позитивне значення $e(t)$ означає, що вихідний сигнал менший за уставку, і його потрібно збільшувати. Нульове значення $e(t)$ відповідає, очевидно, рівності $g(t)$ та $y(t)$ [3; 4].

Розглянемо збільшення помилки управління:

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) = g(t) - y(t) - g(t-1) + y(t-1) = y(t-1) - y(t)$$

Позитивний знак $\Delta e(t)$ означає, що вихідний сигнал зменшується. Негативне значення $\Delta e(t)$ означає, що вихідний сигнал збільшується. Нульове значення $\Delta e(t)$ відповідає постійному вихідному сигналу [3; 4].

Описані принципи формування законів управління приведено на рис. 1, як відображення таблиці лінгвістичних змінних на фазову площину при 5 термах, що описують кожну змінну.

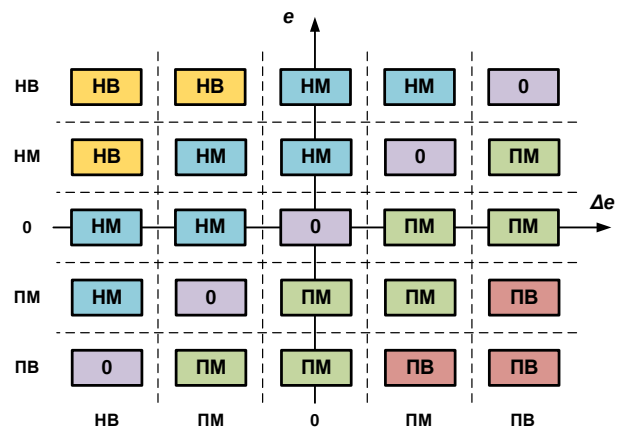


Рис. 1. Відображення закону управління фазову площину

Як свідчить рис. 2, величина модулі сигналу управління пропорційні відстані від прямої $e = \Delta e$. На використанні цієї особливості заснований ковзаючий режим нечіткого регулятора.

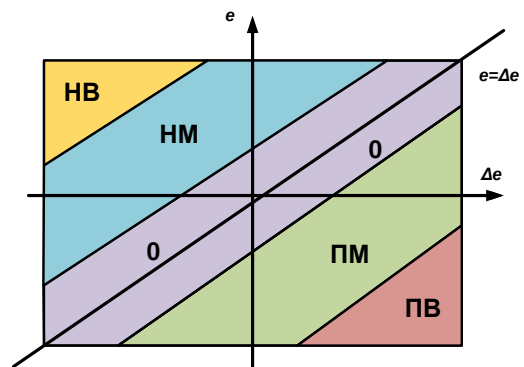


Рис. 2. Різні області сигналу керування на фазовій площині

Ковзаючий режим управління – робастний метод управління нелінійними системами в умовах невизначеності, який застосовують для об'єктів без істотного запізнення [1].

Виділимо на фазовій площині області, де управління однакове (рис. 2).

Розглянемо нелінійний об'єкт з одним входом та одним виходом [2]:

$$x^{(n)} = f(X) + u;$$

$$X = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n)})^T,$$

де $u \in R$ – основний вхід; $x \in R$ – вихід, $X \in R^n$ – вектор стану.

Невизначеність моделі описується функцією:

$$f(X) = \hat{f}(X) + \Delta f(X);$$

$$\Delta f(X) \leq F(X)$$

де оцінка $\hat{f}(X)$ та $F(X)$ – відомі; $\Delta f(X)$ – невідома величина.

Мета управління полягає у виробленні такого сигналу зворотного зв'язку $u = u(X)$, щоб стан системи X наближався до бажаного стану X_d , тобто.

$$e = X - X_d \rightarrow 0.$$

Визначимо скалярну функцію [2]

$$s(X, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e = e^{(n-1)} + C_{n-1}^1 \lambda e^{(n-2)} + C_{n-1}^2 \lambda^2 e^{(n-3)} + \dots + \lambda^{(n-1)} e$$

де λ – позитивна константа.

Рівняння при $s(X, t) = 0$ визначає залежну від часу перемикальну поверхню в просторі станів R^n . Для системи другого порядку ($n = 2$) поверхня ковзання $S(t)$ визначається виразом

$$S(X, t) = \dot{e} + \lambda e = \dot{x} + \lambda x - \dot{x}_d - \lambda x_d = 0$$

Рівняння має єдине рішення $e(t) = 0$ за нульових початкових умов $e(0) = 0$. Проблема керування траєкторією зводиться до завдання забезпечення умови ковзання:

$$\frac{1}{2}(s)^2 \leq -\eta |s|$$

де η – позитивна константа.

Інакше кажучи, для того щоб у системі існував ковзний режим, необхідно сформулювати управління так, щоб точка, що зображає, один раз потрапивши на поверхню ковзання, вже не могла зійти з неї і далі рухалася тільки вздовж цієї поверхні. Нехай у деякий момент часу $S > 0$, тоді похідна за часом dS/dt (швидкість зміни S) має бути негативною. У цьому разі S (відхилення від поверхні ковзання) буде зменшуватися до нуля, тобто зображувальна точка буде рухатися в напрямку до S . Нехай далі точка перетину поверхню дорівнює 0 і тепер $S < 0$. Відповідно, повинно змінитися значення похідної ($dS/dt > 0$). У цьому разі зображувальна точка буде рухатися назад у напрямку до поверхні ковзання [2].

Зазначимо, що режим ковзання вимагає опису фазової траєкторії бажаної системи (лінії

ковзання). Якщо реальна фазова траєкторія перетинає бажану фазову траєкторію, сигнал управління перемикається. Перемикання можуть відбуватися з дуже великою (теоретично нескінченною) частотою, утримуючи при цьому перехідний процес на лінії ковзання. При зміні властивостей об'єкта змінюється лише частота перемикання сигналу управління, а траєкторія, вздовж якої проходить рух, залишається незмінною.

Так, можна вважати, що задана лінія перемикання проходить там, де значення сигналу управління дорівнює нулю. Вище та нижче цієї лінії сигнал керування має різні знаки, а його модуль пропорційний відстані від цієї лінії (рис. 3):

$$S : \Delta e + \lambda e = 0.$$

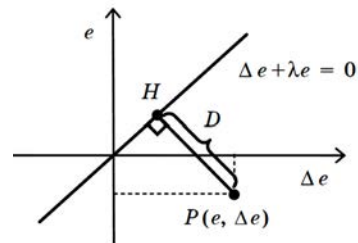


Рис. 3. Відстань до лінії перемикання

Розглянемо розрахунок дистанції від точки у фазовому просторі до лінії перемикання (рис. 3 де H – точка перетину лінії перемикання і перпендикуляра, проведеного до цієї лінії з точки P). Відстань розраховується за відомими формулами (замість похідної – використано збільшення) [2]:

$$d = \sqrt{(e - e_1)^2 + (\Delta e - \Delta e_1)^2} = \frac{|\Delta e_1 + \lambda \Delta e_1|}{\sqrt{1 + \lambda^2}}.$$

Ураховуючи знак, відстань можна описати формулою:

$$D = \operatorname{sgn}(S) \frac{|\Delta e_1 + \lambda \Delta e_1|}{\sqrt{1 + \lambda^2}} = \frac{\Delta e_1 + \lambda \Delta e_1}{\sqrt{1 + \lambda^2}},$$

де

$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } S > 0; \\ -1, & \text{якщо } S < 0. \end{cases}$$

Так, завдяки використанню відстані до лінії перемикання зі знаком можна описати нечіткий закон управління таблицею (див. табл. 2).

Таблиця 2

Одномірний нечіткий закон управління

D	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
D^*	НВ	НМ	0	ПМ	ПВ
U^*	НВ	НМ	0	ПМ	ПВ

У табл. 2 величина D^* визначає лінгвістичне значення відстані, а U^* – лінгвістичне значення

сигналу управління. Число правил, що описують нечіткий закон управління, скорочується в п'ять разів (порівняно з таблицями нечітких правил синтезу нечітких ПД- та ПІ-регуляторів). У цьому полягає основна перевага використання ковзного режиму НР. Справді, величини x_i , зазначені в табл. 2, є центрами відповідних термів, і нечіткий закон управління вимагає завдання всього 5 параметрів, а не 25.

Лінію перемикавання можна описати й у випадку, коли на вході регулятора подається більше двох вхідних змінних. У загальному випадку перемикальна поверхня задається рівнянням:

$$S = e^{(n-1)} + \lambda_{n-1} \lambda e^{(n-1)} + \dots + \lambda_2 \dot{e} + \lambda_1 e = 0$$

Відповідно, відстань до лінії перемикавання визначається [2]:

$$D = \frac{e^{(n-1)} + \lambda_{n-1} \lambda e^{(n-1)} + \dots + \lambda_2 \dot{e} + \lambda_1 e}{\sqrt{1 + \lambda_{n-1}^2 + \dots + \lambda_2^2 + \lambda_1^2}}. \quad (1)$$

Отже, змінюється лише формула обчислення відстані, а алгоритм нечіткого управління залишається тим самим, і завдання проєктування НР значно спрощується.

Результати. Розглянемо моделювання роботи НР у режимі спостереження. Нехай об'єкт управління заданий передавальною функцією

$$W = \frac{6,5}{0,02p^2 + 0,4p + 1}.$$

На рис. 4 представлена схема математичного моделювання в MatLab Simulink з ковзаючим НР у режимі спостереження.

Вхідний сигнал НР формується відповідно до (1). За нечіткий закон управління відповідає табл. 2. При рівномірному розташуванні термів вхідно-вихідних лінгвістичних змінних завдання

конструювання НР зводиться до правильного вибору коефіцієнта λ .

Синтезуємо *Fuzzy Logic Controller* у режимі спостереження. У головному вікні редактора *FIS editor* налаштовується система нечіткого логічного висновку *Mamdani*: вид імплікації (*min*), спосіб агрегування висновків правил (*max*) та метод дефазифікації (*centroid*). Діапазон вхідної та вихідної змінної задається з розміром базової шкали (*Range*= [-1 1]). Для опису вхідних та вихідних логічних змінних для кожної змінної застосовано трикутну функцію належності (див. рис. 5).

Розміщення термів лінгвістичних змінних: вхідної D^* та вихідної U^* наведено на рис. 6.

Опис правил нечіткого закону управління реалізовано в *Rule Editor*, згідно з табл. 2:

1. if (input1 is NBD) then (output1 is NBu) (1)
2. if (input1 is NSD) then (output1 is NSu) (1)
3. if (input1 is ZD) then (output1 is Zu) (1)
4. if (input1 is PSD) then (output1 is PSD) (1)
5. if (input1 is PBD) then (output1 is PBu) (1)

На математичній моделі системи управління (див. рис. 4) із застосуванням функціонування НР у режимі спостереження (ковзаючого регулятора) отримано графік перехідного процесу при різних коефіцієнтах λ (див. рис. 7).

Висновки. Проведений порівняльний аналіз графіків перехідного процесу в системі управління з використанням нечіткого регулятора в режимі спостереження при різних коефіцієнтах λ довів, що

1) при збільшенні коефіцієнта λ до значення 0,5 перехідний процес за керованим параметром набуває експоненціальної форми, що дає змогу зменшити динамічну помилку;

2) при зменшенні коефіцієнта λ графік перехідного процесу набуває коливальної форми, що приводить до збільшення динамічної помилки, а також зменшення швидкодії системи управління при відпрацюванні збурень.

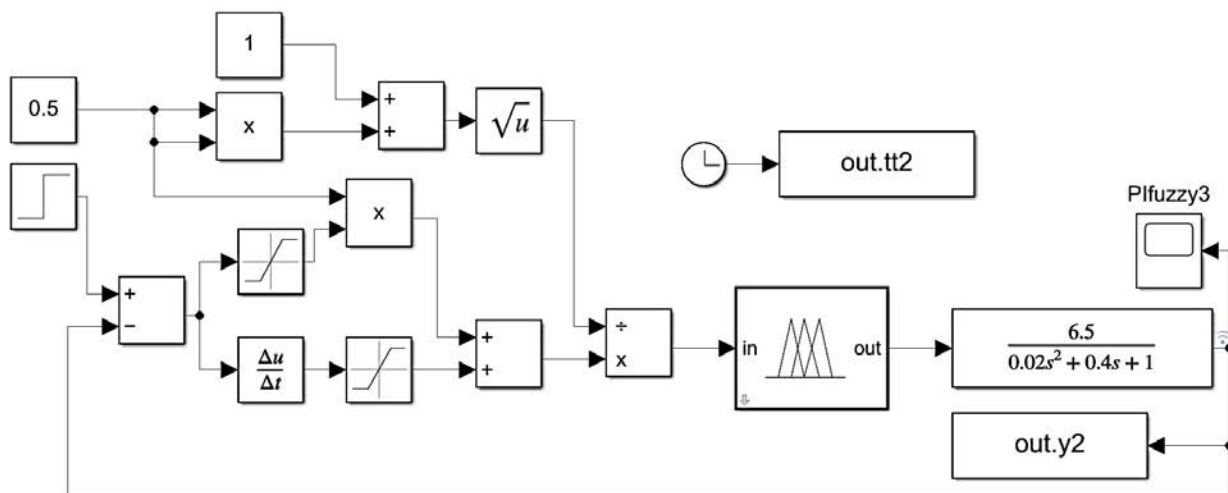


Рис. 4. Математична модель НР у режимі спостереження

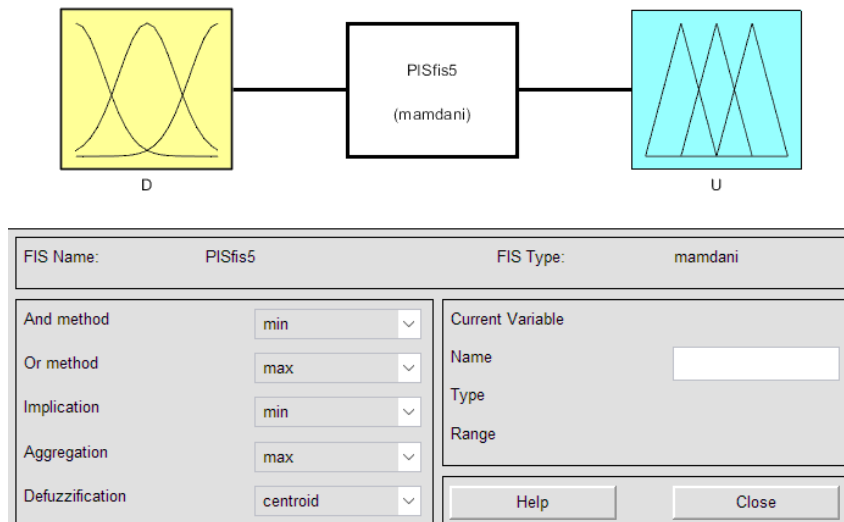


Рис. 5. Налаштування інтерфейсу FIS editor

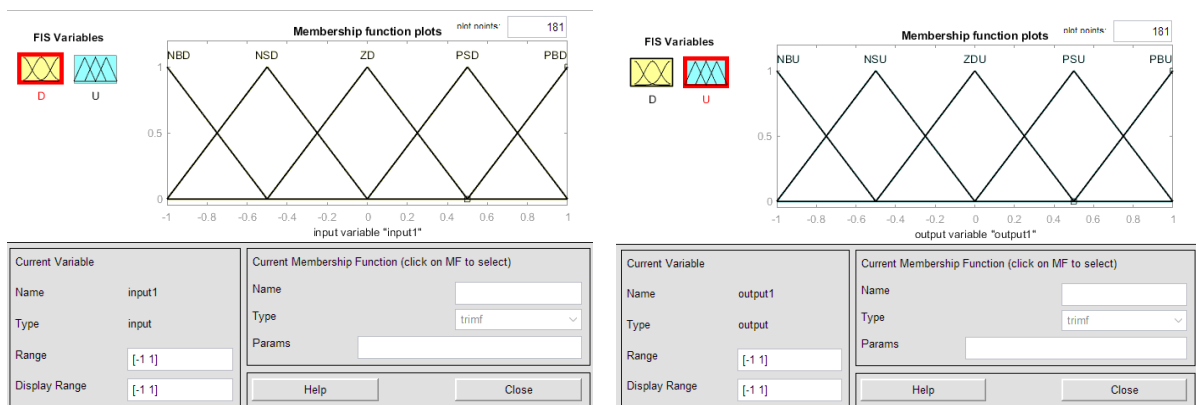


Рис. 6. Результат налаштування функцій належності лінгвістичних змінних:
а) вхідної D^* ; б) вихідної U^*

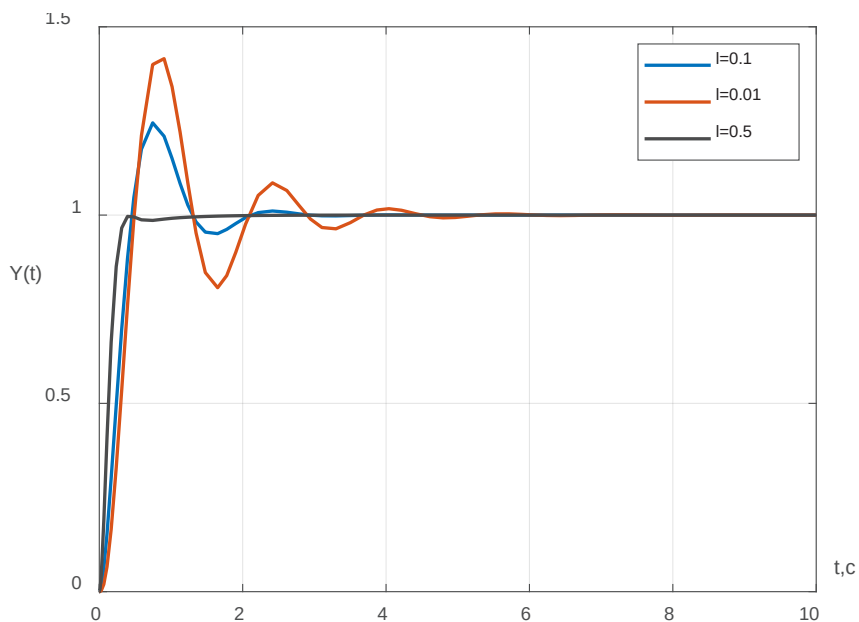


Рис. 7. Графік перехідного процесу для синтезованого НР при різних коефіцієнтах λ

ЛІТЕРАТУРА:

1. Новіков П. В., Бунке О. С. Інтелектуальна система керування інерційними технологічними параметрами на базі fuzzy-релятора. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XV міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : мат. конф. Київ, 2017. С. 31–32.
2. Нейронні мережі в системах автоматизації: курс лекцій / Уклад. О. В. Разживін. Запоріжжя : ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», 2023. 296 с.
3. Разживін О. В., Ільїнський М. І. Синтез нечіткого супервізора, корекцій коефіцієнтів ПІД-регулятора на підставі інформації про помилку та її похідну. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 74–82. DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-9>
4. Разживін О. В., Залятов А. Ф., Сердюк Т. В., Ільїнський М. І. Супервізорне управління з інкрементальною зміною коефіцієнтів регулятора. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 4. С. 119–125. DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-15>

REFERENCES:

1. Novikov, P. V., & Bunke, O. S. (2017). Intelktual'na systema keruvannya inertsynymy tekhnolohichnymy parametramy na bazi fuzzy-relyatora [Intelligent control system for inertial technological parameters based on fuzzy relator]. Suchasni problemy naukovooho zabezpechennya enerhetyky: XV mizhnar. nauk.-prak. konf. asp., mah. i stud. : mat. konf., 31–32 [in Ukrainian].
2. Razzhyvin, O. V. (2023). Neyronni merezhy v systemakh avtomatyzatsiyi: kurs lektsiy [Neural Networks in Automation Systems: Course of Lectures]. Zaporizhzhya: TOV «Tekhnichnyy universytet «Metinvest politekhnika», 296 p. [in Ukrainian].
3. Razzhyvin, O. V., & Ilyinsky, M. I. (2025). Syntez nechitkoho supervizora, korektsiy koefitsiyentiv PID-rehulyatora na pidstavi informatsiyi pro pomyлку ta yiyi pokhidnu [Synthesis of a fuzzy supervisor for correction of PID controller coefficients based on error and its derivative]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky*, 3, 74–82. DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-9> [in Ukrainian].
4. Razzhyvin, O. V., Zalyatov, A. F., Serdyuk, T. V., & Ilyinsky, M. I. (2025). Supervizorne upravlinnia z inkrementalnoiu zminoiu koefitsiyentiv rehulyatora [Supervisory control with incremental change of controller coefficients]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky*, 4, 119–125. DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-15> [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 10.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 532.542.1: 681.518

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

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В МАГІСТРАЛЬНОМУ ТРУБОПРОВОДІ

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

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: 55808117000

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

Антіпов Максим Михайлович,

магістрант кафедри автоматизації, електро– та робототехнічних систем
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0007-9579-7807

Однією з особливостей роботи насосних станцій забору й перекачування води є принципово невизначений режим їх роботи, що часто не дає змоги на стадії проектування однозначно визначитися з вибором робочої машини. Основним вимогам до системи водопостачання є забезпечення заданого напору для споживачів води при постійних і змінних витратах води. Ускладнюється це завдання тим, що в процесі експлуатації насосної станції режими роботи установки істотно змінюються. Отже, основною проблемою транспортування води є підтримка заданого тиску. Проведений аналіз способів регулювання подання насосних установок довів, що майже всі вони спрямовані на технологічні завдання й майже не враховують енергетичних аспектів транспорту води, що призводить до втрат споживаної електроенергії через неефективну роботу дросельного органу, створення надлишкових напорів у трубопроводі та різного роду витоків води в мережі та в споживача. Додатково питання плавного регулювання тиску в трубопроводі є також актуальним через те, що різкі зміни тиску в трубопроводі є найбільшою і найпоширенішою причиною виходу з ладу обладнання насосної станції. Тому мета роботи стосується зменшення затрат енергоресурсів насосної станції через розробку та дослідження автоматизованої системи регулювання тиску в магістральному трубопроводі. Сучасні підходи до виконання цього завдання пов'язані з використанням у контурі керування насосами перетворювачів частоти, що дає змогу транспортувати воду з плавним та точним регулюванням робочих параметрів насосної установки без непродуктивних витрат електроенергії. Удосконалення системи регулювання тиску в магістральному трубопроводі дає змогу покращити роботу системи, що підвищує техніко-економічні показники роботи насосної станції і зменшує збитки підприємства.

Ключові слова: водонасосна станція, напір, виток, насос, засувка, байпас, приводний двигун, перетворювач частоти, система регулювання тиску, параметр, структура системи, датчик тиску.

Subotin Oleg, Koifman Olexsiy, Simkin Oleksandr, Antipov Maksym. Improvement of the pressure regulation system in the main pipeline

One of the features of the operation of pumping stations for water intake and pumping is the fundamentally uncertain mode of their operation, which often does not allow a clear decision on the choice of working machine

at the design stage. The main requirements for the water supply system are to ensure a given pressure for water consumers at constant and variable water flows. This task is complicated by the fact that during the operation of the pumping station, the operating modes of the installation change significantly. Therefore, the main problem of water transportation is to maintain a given pressure. The analysis of methods for regulating the supply of pumping stations has shown that almost all of them are aimed at technological tasks and practically do not take into account the energy aspects of water transportation, which leads to losses of consumed electricity due to inefficient operation of the throttle body, the creation of excess pressure in the pipeline and various kinds of water leaks in the network and at the consumer. In addition, the issue of smooth pressure regulation in the pipeline is also relevant due to the fact that sudden changes in pressure in the pipeline are the largest and most common cause of failure of pumping station equipment. Therefore, the purpose of the work is to reduce the energy costs of the pumping station through the development and research of an automated pressure control system in the main pipeline. Modern approaches to solving this problem are associated with the use of frequency converters in the pump control circuit, which allows water transport with smooth and accurate regulation of the operating parameters of the pumping unit without unproductive electricity consumption. Improving the pressure control system in the main pipeline allows you to improve the operation of the system, which increases the technical and economic performance of the pumping station and reduces the losses of the enterprise.

Key words: water pumping station, pressure, leaks, pump, valve, bypass, drive motor, frequency converter, pressure control system, parameter, system structure, pressure sensor.

Вступ. Однією з особливостей роботи насосних станцій забору й перекачування води є принципово невизначений режим їх роботи, що пов'язано з добовим і сезонним змінами споживання води як промисловими підприємствами, так і населенням. Ця невизначеність часто не дає змоги на стадії проектування вибрати робочу машину, яка оптимально задовольняє режиму роботи системи. Ба більше, в процесі експлуатації режими роботи установки істотно змінюються [1].

Традиційні способи регулювання подачі насосних установок спрямовані на технологічні завдання й майже не враховують енергетичних аспектів транспортування води. За такого регулювання до 15 %, а в окремих випадках до 30 % споживаної електроенергії витрачається нерационально через: втрати енергії в дросельовальному органі; створення надлишкових напорів у трубопроводній мережі; витоків і непродуктивних витрат води в мережі та в споживача [2].

При узгодженні тиску на виході насоса з необхідним у трубопроводі методом дроселювання у водовід уводиться засувка, тобто створюється механічне перешкодження вільному проходженню води. При цьому зі зменшенням подачі води потужність, що віддається в систему трубопроводу, швидко знижується (пропорційно квадрата подачі), а потужність на валу насоса залишається майже незмінною. Різницю цих двох потужностей становлять втрати, які виділяють у навколишнє середовище і воду у вигляді тепла. При іншому способі регулювання продуктивності й тиску на виході насосної станції шляхом періодичного включення і відключення окремих насосних агрегатів перевитрата електроенергії відбувається через появу надлишкового тиску у водоводах при підключенні насосних агрегатів сумарною потужністю,

на що також непродуктивно витрачається потужність приводних двигунів [3; 4].

Крім того, якщо вмикання або вимикання насосів проводиться задля підтримки технологічного параметра (тиску в трубопроводі), то частота включення приводних двигунів насосів тим вища, чим точніше підтримується технологічний параметр. Часті ввімкнення і вимкнення двигунів викликають механічне зношення й передчасний вихід з ладу майже всього обладнання насосної станції – від електрообладнання, де виникають небажані кидки струмів і просадки напруги, до механічної системи валів і двигуна, де виникають пікові крутні моменти. При швидкому пуску насоса зростання напору в трубопроводі, як правило, викликає гідравлічні удари. Помічено, що більшість розривів трубопроводів мали місце в момент пуску насосів. Аналізовані причини ведуть до додаткових витрат на заміну або ремонт обладнання і трубопроводів [5; 6].

Для усунення зазначених недоліків проводять модернізацію обладнання та виконавчих механізмів на більш сучасні. Причому намагаються добитися як найефективнішого варіанта функціонування системи загалом.

Метою роботи є зменшення затрат енергоресурсів насосної станції шляхом розробки та дослідження автоматизованої системи регулювання тиску в трубопроводі.

Методи та методики дослідження. Насоси магістрального трубопроводу є складними технічними складниками і відіграють вирішальну роль у транспортуванні води. Одні з них призначені для підтримки постійного тиску в трубі, інші – для підвищення показника тиску при його контролі. Основним завданням транспортування води є підтримка тиску, встановленого нормативними вимогами для певного елемента системи або регіону. Сучасні підходи до

регулювання тиску в трубопроводі пов'язані з використанням у контурі керування насосами перетворювачів частоти (далі – ПЧ) [4; 5].

Основними вимогами до системи водопостачання є забезпечення заданого напору для споживачів води при постійних і змінних витратах води [3; 4].

Водонасосна станція здійснює подання прісної води для технологічних установок і протипожежних потреб з місцевих джерел водопостачання, працює цілодобово протягом усього року й при цьому витрачає близько 760 000 м³ / рік води. Споживачами насосної станції є: каналізаційна насосна станція (далі – КНС), дожимна насосна станція (далі – ДНС).

Технологічна схема насосної станції (далі – НС) наведена на рис. 1.

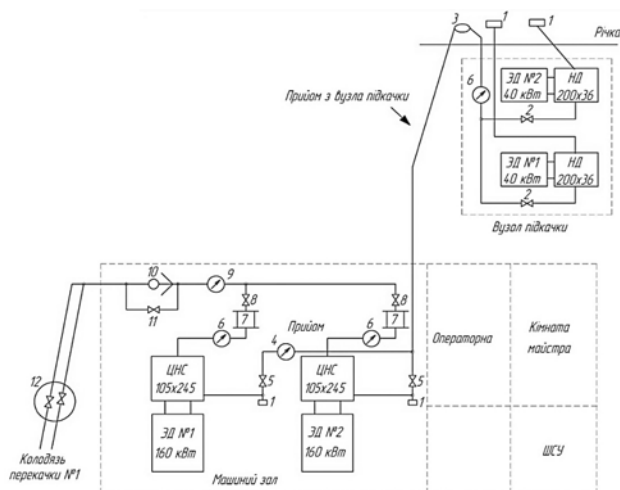


Рис. 1. Технологічна схема насосної станції

Водозбір здійснюється за допомогою насосів підкачування серії НД-200 × 36 з приводними асинхронними двигунами серії ВАО-81-2У2 потужністю 32 і 40 кВт. Всмоктувальний трубопровід насосів НД має фільтр 1, що захищає насос від забруднення. На викиді насоси НД мають засувки 2 – 40 × 100, за допомогою яких регулюється водозбір і технічний манометр 6 на викиді показує тиск, під яким перекачується вода. Ця система з насосами підкачки утворює вузол підкачування. Далі по трубопроводу через засувки на прийомі 5 – 150 × 40 вода надходить у насос ЦНС-105 × 245, який приводиться в дію асинхронним двигуном серії ВАО-315м-2У2-5 потужністю 160 кВт. З насоса ЦНС вода надходить у колодязь перекачування, а з нього до споживачів. У колодязі перекачування встановлена засувка 12 до споживачів 150 × 210. Технічний манометр 4 на прийомі показує тиск, під яким надходить вода в насос ЦНС. Лічильники СВУ-200 показують кількість

води, що надається споживачу. Манометр 9 на колекторі показує тиск у трубопроводі, під яким перекачується вода. Зворотний клапан 10 запобігає поверненню води.

Отже, на НС встановлено два насосні агрегати, які взаємно резервують один одного. Кожен агрегат має два насоси і два двигуни: насоси підкачки НД-200 × 36 з приводними асинхронними двигунами серії ВАО-81-2У2 потужністю 40 кВт і насоси ЦНС-105 × 245 з асинхронним приводним двигуном ВАО-315м-2У2-5 потужністю 160 кВт, тобто використовують 4 насоси і 4 двигуни отримують живлення від мережі.

У насосному агрегаті насоси НД і ЦНС працюють за послідовною схемою на один водовід, з якого рідина за допомогою дроселювальних органів розподіляється до споживачів. Нині регулювання продуктивності насосів здійснюється дроселюванням напірної лінії, тобто в лінію вводиться засувка, відчиняючи або причиняючи яку регулюють подання насосів. Так, вводиться додатковий опір у всмоктувальний трубопровід, що погіршує ККД двигуна і веде до надмірного споживання електроенергії.

Приймальний клапан слугує запобіганню зливу рідини з насоса назад у резервуар через використання відцентрового насоса.

Аналіз об'єкта показав низку недоліків, що погіршують його роботу: відсутність приймального клапана у всмоктувальному трубопроводі; використання в одному насосному агрегаті два насоса і два двигуни (наявність вузла підкачки); регулювання продуктивності насосів методом дроселювання напірної лінії.

Усунення визначених недоліків можливе: встановленням приймального клапана у всмоктувальному трубопроводі; використання в одному насосному агрегаті одного більш потужного насоса для забезпечення необхідного напору для відкачування рідини й одного двигуна; підвищення ефективності енергоспоживання насосів через плавну зміну швидкості обертання приводного двигуна шляхом використання ПЧ.

Результати. Проектована автоматизована система регулювання тиску в магістральному трубопроводі реалізується на модернізованій НС, тому розрахунок й аналіз її електричного навантаження є актуальним завданням.

Основним електричним навантаженням водонасосної станції є два насосні агрегати для перекачування прісної води, що працюють на заданий трубопровід, тому проводиться розрахунок насосів водонасосної станції з метою розробки системи регулювання тиску в трубопроводі [3; 4].

Мета досягається виконанням таких завдань:

- розрахунок та вибір альтернативного насоса;
- розрахунок потужності та вибір електродвигуна для насоса;
- на основі відповідних розрахунків порівняльний аналіз параметрів трубопроводу при регулюванні частоти обертання двигуна за допомогою перетворювача частоти та при дросельному регулюванні;
- пропозиції щодо вдосконалення системи регулювання тиску.

Першим етапом проводиться розрахунок та вибір насоса.

Насос працює цілодобово, тому годинне подання насоса Q визначиться:

$$Q = \frac{\alpha_1 \cdot Q_{\text{м.д.}}}{24} = \frac{1,02 \cdot 2345}{24} = 99,66 \text{ м}^3/\text{год}, \quad (1)$$

де α_1 – коефіцієнт витрати води на власні потреби водопроводу, приймається рівним 1,01...1,03; $Q_{\text{м.д.}}$ – максимальна добова витрата води, м³/доба.

Добова витрата води визначається з графіка закачування води (рис. 2), який будується за даними журналу закачування води на водонасосній станції за два місяці поточного року: один зимовий (січень), один літній (липень).

Характеристики використовуваних насосів описують рівнянням:

$$H = H_{\text{max}} - S \cdot Q^2, \quad (2)$$

$$S = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}^2}. \quad (3)$$

де H , H_{max} – напір при заданій та максимальній продуктивності насоса, м; S – коефіцієнт гідравлічного опору, с²/м⁵; Q – продуктивність насоса, м³/с.

Коефіцієнт гідравлічного опору насоса S визначають по координатах двох точок характеристики насоса, наприклад, точки при $Q = 0$ і $Q = Q_{\text{ном}}$.

Розрахунок характеристики насоса НД-200 × 36.

Для розрахунку використовують координати: $(H_0; Q_0) = (45; 0)$; $(H_{\text{ном}}; Q_{\text{ном}}) = (36; 200)$. Тоді коефіцієнт гідравлічного опору насоса S буде:

$$S = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}^2} = \frac{45 - 36}{(200 / 3600)^2} = 2915,53 \text{ с}^2 / \text{м}^5. \quad (4)$$

Рівняння характеристики насоса НД-200 × 36 має такий вигляд:

$$H = H_{\text{max}} - 2915,53 \cdot Q^2. \quad (5)$$

Характеристика насоса НД-200 × 36 наведена на рис. 3.

Розрахунок характеристики насоса ЦНС-105 × 245.

Для розрахунку використовують координати: $(H_0; Q_0) = (265,5; 0)$; $(H_{\text{ном}}; Q_{\text{ном}}) = (245; 105)$. Тоді коефіцієнт гідравлічного опору насоса S буде:

$$S = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}^2} = \frac{265,5 - 245}{(105 / 3600)^2} = 24098 \text{ с}^2 / \text{м}^5. \quad (6)$$

Рівняння характеристики насоса ЦНС-105 × 245 має такий вигляд:

$$H = H_{\text{max}} - 24098 \cdot Q^2. \quad (7)$$

Характеристику насоса ЦНС-105 × 245 наведено на рис. 3.

Дані насоси працюють послідовно. До послідовного включення насосів вдаються за

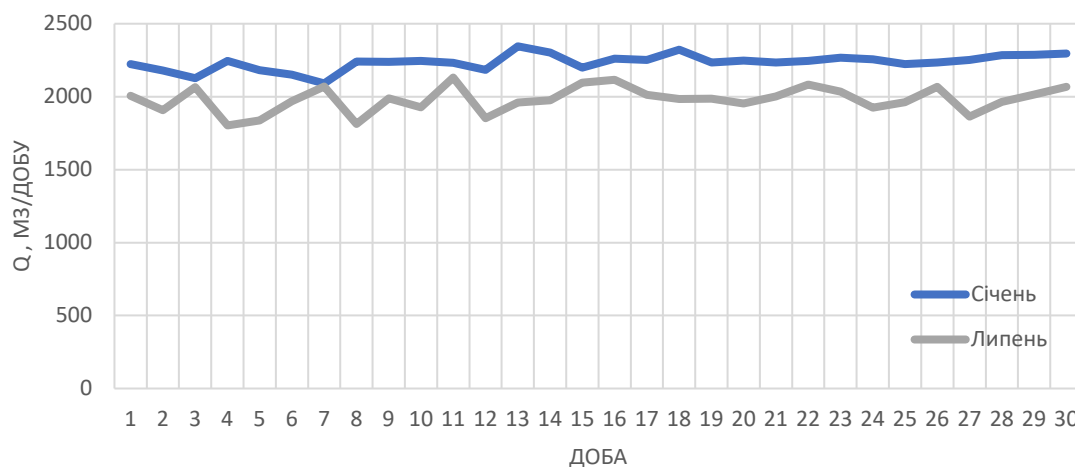


Рис. 2. Графік закачування води в різні періоди року

необхідності збільшити створюваний напір. Для отримання сумарної характеристики двох послідовно включених насосів необхідно скласти їх напори при постійному поданні, тобто підсумувати ординати характеристик насосів. Побудовану загальну характеристику насосів НД-200 × 36 і ЦНС-105 × 245 наведено на рис. 3.

Характеристиками кожного з насосів окремо будуть криві I і II, сумарною характеристикою послідовно включених насосів – крива I+II.

Збільшення напору при послідовному включенні насосів, так само як і збільшення подачі при паралельному їх включенні залежатиме від форм характеристик насоса і системи. Більший ефект від послідовного включення насосів отримаємо в тому випадку, якщо характеристики насосів системи будуть більш пологими, або у випадку, якщо їх напірні засувки будуть відкриті повністю, а цей режим відповідатиме максимальному ККД [3].

З аналізу графіків на рис. 3 видно, що робочою є точка з координатами, які відповідають значенням параметрів $Q = 115 \text{ м}^3/\text{год}$ і $H = 282 \text{ м}$.

Ці параметри роботи задовольняє насос ЦНС-105 × 294.

Розрахунок характеристики насоса ЦНС-105 × 294.

Для розрахунку використовують координати: $(H_0; Q_0) = (315; 0)$, $(H_{\text{НОМ}}; Q_{\text{НОМ}}) = (294; 105)$. Тоді коефіцієнт гідравлічного опору насоса S буде:

$$S = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{НОМ}}}{Q_{\text{НОМ}}^2} = \frac{315 - 294}{(105/3600)^2} = 24685,71 \text{ с}^2/\text{м}^5. \quad (8)$$

Рівняння характеристика насоса ЦНС-105 × 294 має такий вигляд:

$$H = H_{\text{max}} - 24685,71 \cdot Q^2. \quad (9)$$

Характеристику насоса ЦНС-105 × 294 наведено на рис. 3.

Так, замість послідовного включення насосів НД-200 × 36 і ЦНС-105 × 245 можна використовувати один насос типу ЦНС-105 × 294. Основні параметри насоса ЦНС-105 × 294: потужність $P = 115 \text{ кВт}$; подання $Q = 105 \text{ м}^3/\text{год}$; напір $H = 294 \text{ м}$; синхронна частота обертання $n_{\text{с.нас.}} = 3000 \text{ об/хв}$.

Другий етап – розрахунок потужності й вибір електродвигуна для насоса.

Потужність приводного двигуна насоса ЦНС-105 × 294 буде:

$$P_0 \geq k \cdot P_{\text{нас.}}; \quad (10)$$

$$P_0 = k \cdot \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta} = 1,15 \cdot \frac{105 \cdot 294 \cdot 1000 \cdot 9,81}{60 \cdot 60 \cdot 0,73} = 132,52 \text{ кВт}, \quad (11)$$

де k – коефіцієнт запасу, для потужності 50 ... 300 кВт приймається $k=1,15$; Q – подання насоса, $\text{м}^3/\text{доба}$; H – напір насоса, м ; ρ – щільність рідини, для води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; η – ККД насоса, %.

Потужність приводного двигуна насоса вибирається за умови, що $P_d \geq 132,52 \text{ кВт}$ при тривалому режимі роботи.

Вибір двигуна по обертовому моменту робиться за умови, що:

$$M_{\text{н.д.}} \geq M_{\text{н.нас.}}, \quad (12)$$

$$M_{\text{н.нас.}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{н.нас.}}}{n} = 9,55 \cdot \frac{132520}{3000} = 421,86 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (13)$$

де $M_{\text{н.д.}}$ – номінальний обертаючий момент на валу двигуна, $\text{Н} \cdot \text{м}$; $M_{\text{н.нас.}}$ – номінальний

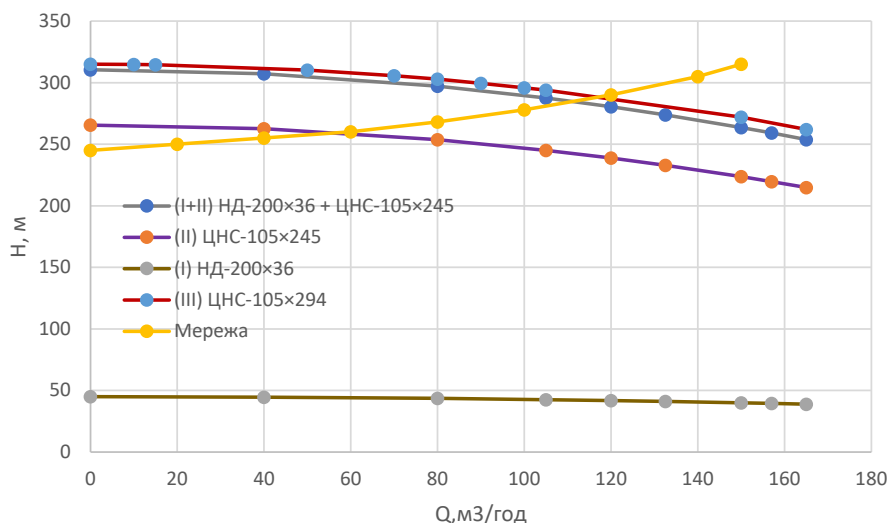


Рис. 3. Графіки залежності напору від подачі для насосів НД-200×36 (I) і ЦНС-105×245 (II), їх послідовної роботи (I+II) та ЦНС-105×294 (III)

обертальний момент на валу насоса, Н·м;
 $P_{н.нас.}$ – номінальна потужність насоса, Вт.

Вибираючи двигуни, слід прагнути до того, щоб швидкість обертання була, за можливості, близькою до швидкості обертання механізму. Це дасть змогу застосувати безпосереднє з'єднання двигуна з механізмом і позбутися від додаткових втрат при інших видах передачі.

Синхронна частота обертання насоса
 $n_{с.нас.} = 3000 \text{ об / хв}.$

З огляду на вищенаведені умови, вибираємо двигун ВАО-315М-2У2-5.

Цей двигун нині використовується на водонасосній станції. Основні технічні параметри двигуна: потужність $P_0 = 160 \text{ кВт}$; номінальна частота обертання $n_n = 2960 \text{ об/хв}$; струм $I = 297 \text{ А}$ при напрузі $U = 380 \text{ В}$.

Далі проводиться порівняльний аналіз параметрів трубопроводу при регулюванні частоти обертання двигуна за допомогою перетворювача частоти та при дросельному регулюванні.

Регулювання дроселюванням.

Споживана потужність при дроселюванні визначається за формулою:

$$P_{\text{дрос.}} = P_{\text{min}} + (P_{\text{max}} - P_{\text{min}}) \cdot \left(\frac{Q_{\text{роб.}}}{Q_{\text{max}}} \right), \quad (14)$$

де P_{min} , P_{max} – споживана потужність при повністю закритій засувці, тобто при $Q = 0 \text{ м}^3/\text{год}$ та повністю відкритій засувці, тобто при $Q_{\text{max}} = 150 \text{ м}^3/\text{год.}$; $Q_{\text{роб.}}$ / Q_{max} – відносна продуктивність.

При зменшенні витрати проти нормального з'являються вторинні течії, які спотворюють головний потік і при витраті, що дорівнює нулю, поширюються по всьому робочому колу.

Споживана потужність P_{min} визначається так:

$$P_{\text{min}} = 0,3 \cdot P_{н.нас.} = 0,3 \cdot 115 = 34,5 \text{ кВт}. \quad (15)$$

Напір насоса при максимальній продуктивності:

$$H = H_{\text{max}} - 24685,71 \cdot Q^2 = 315 - 24685,71 \cdot (150 / 3600)^2 = 272,1429 \text{ м}. \quad (16)$$

Споживана потужність з урахуванням двигуна вузла підкачки (40 кВт):

$$P_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}} \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta} + 40 = \frac{150 \cdot 272,1429 \cdot 1000 \cdot 9,81}{60 \cdot 60 \cdot 0,73} + 40 = 192,381 \text{ кВт}, \quad (17)$$

Регулювання швидкості двигуна за допомогою перетворювача частоти.

Споживана потужність при частотному регулюванні:

$$P_{\text{ч}} = P_{н.нас.} \cdot \left(\frac{Q_{\text{р}}}{Q_{н.нас.}} \right)^3. \quad (18)$$

За результатами розрахунків будуються залежності споживаної потужності при дроселюванні від пропускної здатності засувки та споживаної потужності при частотному регулюванні залежно від подачі насоса (рис. 4).

Аналіз результатів доводить, що регулювання за допомогою ПЧ вигідніше, ніж дроселюванням. При використанні ПЧ пуск плавний, менші пускові струми, що призводить до малого споживання електроенергії.

Останнім етапом роботи є розробка та дослідження структури системи регулювання тиску в трубопроводі [4; 5].

Виконання цього завдання є окремим дослідженням через те, що аналіз використання в таких системах ПЧ розглядається або в сталому режимі роботи, або в режимі їх пуску. При цьому не враховується той факт, що розміщення насоса в контурі автоматичного регулювання тиску змушує електропривід у перехідних режимах споживати енергію на подолання інерційного опору, пов'язаного з великими маховими моментами на валу двигуна. За поганої якості регулювання (великої коливальності й величини перерегулювання) ці втрати можуть бути значними [6; 7].

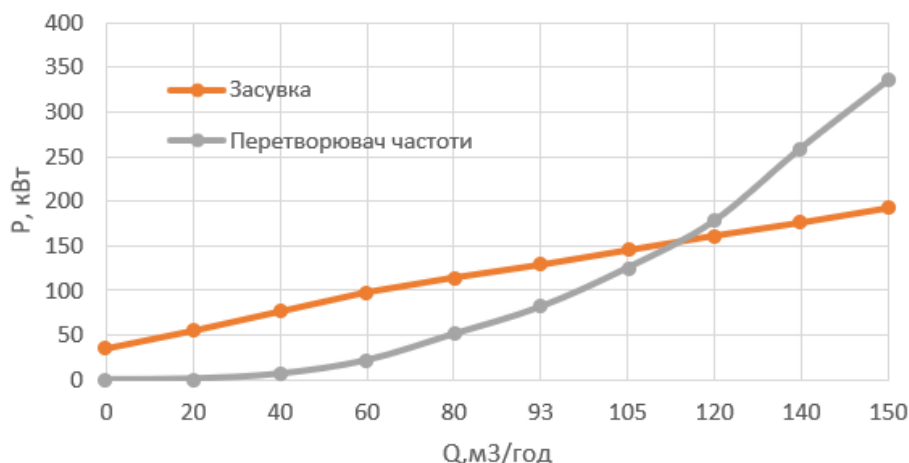


Рис. 4. Графік споживання потужності механізмом при різних способах регулювання

Також для підвищення якості регулювання системою тиску в трубопроводі окремо вирішується питання добору датчика тиску [8].

Висновки. Використання надійного регульованого електроприводу створює передумови для розробки сучасної технології транспорту води з плавним регулюванням робочих параметрів насосної установки без непродуктивних витрат електроенергії і з широкими можливостями підвищення точності та ефективності технологічних критеріїв роботи систем водопостачання. При цьому геометричним місцем робочих точок насосної установки стають характеристики трубопроводів, а не насосів, як

у випадку регулювання подачі насосних агрегатів з постійною частотою обертання.

Досягнення мети дасть змогу вирішити також питання плавного регулювання тиску в трубопроводі. Адже різкі зміни тиску в трубопроводі є найбільшою і найпоширенішою причиною виходу з ладу НС.

Модернізація системи регулювання тиску в магістральному трубопроводі не лише оптимізує роботу системи, а й покращить техніко-економічні показники та збільшить строк експлуатації обладнання системи. Застосування проєкту модернізації системи регулювання тиску у водопроводі зменшить збитки підприємства.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Naga Venkata Saidileep Korlapati, Faisal Khan, Quddus Noor, Saadat Mirza, Sreeram Vaddiraju. Review and analysis of pipeline leak detection methods. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2022. Vol. 2. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100074>.
2. Як регулювання тиску у водопроводі подовжує ресурс труб і зменшує кількість аварій. *Jooby*. URL: <https://jooby.eu/uk/blog/yak-regulyuvannya-tisku-u-vodoprovodi-podovzhuye-resurs-trub-i-zmenshuje-kilkist-avarij/> (дата звернення: 20.11.2025).
3. Орел В. І. Регулювання напору в гідравлічній системі. *Вісник НУ «Львівська політехніка». «Теплоенергетика. Інженерія довілля. Автоматизація»*. 2013. С. 281–284.
4. Соїч А. В., Бевза О. М. Електронна система керування тиском в мережі водопостачання. *Перспективні напрямки сучасної електроніки: матеріали XII науково-практичної конференції (Київ, 19–20 квітня 2018 р.)*. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 139–143.
5. Суботін О. В., Кучеренко С. А. Способи та засоби виявлення витоків води. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції (Краматорськ, 01–04 червня 2021 р.)*. Краматорськ : ДДМА, 2021. С. 129.
6. Carrie Powers. Underground Pipeline Leak Detection Methods. *Polyguard*. 2024. URL: <https://polyguard.com/blog/underground-pipeline-leak-detection-methods> (дата звернення: 20.11.2025).
7. Суботін О. В., Сус С. П., Петрухін Я. І. Аналіз виробничих заводів, що впливають на якість роботи засобів контролю та передачі інформації. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 4. С. 126–133. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-16>.
8. Maroua Abdelhafidh. Hybrid mechanism for remote water Pipeline Monitoring System. *13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC): conference proceedings (June 26–30, 2017. Valencia, Spain)*. Valencia, Spain: IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2017.7986614>.

REFERENCES:

1. Naga Venkata Saidileep Korlapati, Faisal Khan, Quddus Noor, Saadat Mirza, Sreeram Vaddiraju (2022). Review and analysis of pipeline leak detection methods. *Journal of Pipeline Science and Engineering*.
2. Yak rehulyuvannya tysku u vodoprovodi podovzhuye resurs trub i zmenshuje kilkist avarij [How pressure regulation in a water supply system extends the service life of pipes and reduces the number of accidents]. *Jooby*. Retrieved from <https://jooby.eu/uk/blog/yak-regulyuvannya-tisku-u-vodoprovodi-podovzhuye-resurs-trub-i-zmenshuje-kilkist-avarij/> (data zvernennya: 20.11.2025) [in Ukrainian].
3. Orel, V. I. (2013). Rehulyuvannya naporu v hidravlichniy systemi [Pressure regulation in a hydraulic system]. *Visnyk NU "Lvivska politekhnika" "Teploenergetyka. Inzheneriya dovkillia. Avtomatyzatsiya"*, 281–284 [in Ukrainian].
4. Soyich, A. V., Bevza, O. M. (2018). Elektronna systema keruvannya tyskom v merezhi vodopostachannya [Electronic pressure control system in the water supply network]. *Perspektyvni napryamky suchasnoyi elektroniky: materialy XII-yi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (Kyiv, 19 – 20 kvitnya 2018 r.). Kyiv : KPI im. Ihorya Sikorskoho, 139–143 [in Ukrainian].
5. Subotin, O. V., Kucherenko, S. A. (2021). Spособy ta zasoby vyavlennya vytokiv vody [Methods and means of detecting water leaks]. *Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku: materialy XIX Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* (Kramators'k, 01–04 chervnya 2021 r.). Kramators'k : DDMA, 129 [in Ukrainian].
6. Carrie Powers (2024). Underground Pipeline Leak Detection Methods. Retrieved from <https://polyguard.com/blog/underground-pipeline-leak-detection-methods>. Accessed 20 Nov 2025.
7. Subotin, O. V., Sus, S. P., & Petrukhin, Ya. I. (2025). Analiz vyrobnychkh zavod, shcho vplyvayut' na yakist' roboty zasobiv kontrolyu ta peredachi informatsiyi [Analysis of production disturbances affecting the quality of control and information transmission]. *Naukovyy Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky*, 4, 126–133 [in Ukrainian].
8. Maroua Abdelhafidh (2017). Hybrid mechanism for remote water Pipeline Monitoring System. *13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 17.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

UDC 62-523: 62-83-52 (075.8)

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-8>

CONTROL SYSTEM FOR DRILLING RIG MACHINE ELECTROHYDRAULIC FEED DRIVE

Khilov Victor Serhiiovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Professor at the Department of Automation, Electrical and Robotic Systems

LIMITED LIABILITY COMPANY "TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC"

ORCID ID: 0000-0002-5583-4323

Melnichuk Alina Vasilivina,

Student

LIMITED LIABILITY COMPANY "TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC"

Tropanets Andriy Oleksandrovych,

Student

LIMITED LIABILITY COMPANY "TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC"

The objective of research is to develop a scientifically based approach to the synthesis of a positional control system for the hydraulic drive of a roller cone drilling machine, which ensures increased positioning accuracy, stability of transient processes, and drive efficiency under variable loads typical of the drilling process.

The study has been conducted based on: the application of differential equations of hydraulic drive dynamics (equations describing the movement of the executive hydraulic cylinder, pressure dynamics in cavities, working fluid flow, and elastic properties of the hydraulic line are used); linearization of nonlinear equations (for stability analysis and controller synthesis, the hydraulic system is reduced to a linearized model in the vicinity of the operating point); modeling using transfer functions and block diagrams; Laplace transforms are used in the formation of drive transfer functions and controllers for system analysis in the frequency and time domains; methods of automatic control theory (stability analysis; controller structure selection; synthesis of P-, PI-, PID-controllers for positional control) were applied; optimization synthesis methods for calculating controller parameters that allow setting the desired eigenvalues of the closed system and ensuring the required positioning accuracy of the drive; modeling in MATLAB/Simulink (used to verify the obtained mathematical model and check the operation of the synthesized control algorithm).

Theoretical and experimental research yielded the following scientific and practical results: a mathematical model of the hydraulic drive for a roller cone drilling machine was developed, considering the nonlinear characteristics of hydraulic equipment, the compressibility of the working fluid, hydraulic losses, and the dynamics of the actuating hydraulic cylinder. The model allowed us to investigate the influence of system parameters on positioning accuracy; we analyzed the dynamic properties of the drive and identified the main factors that limit the accuracy and speed of the position control system, in particular: hydraulic delays, force disturbances from the drilling process, and pressure fluctuations in the hydraulic lines; a synthesis of the positional control system was carried out using methods of automatic control theory; based on a linearized model, the choice of the regulator structure was justified and its optimal parameters were determined; an algorithm for positional feed control was proposed, which ensures stable transient processes and high accuracy of the specified position of the actuator under variable loads; a structural diagram of the control system was developed, including a feedback module, corrective links, and an executive hydraulic drive, and its operability was confirmed by modeling; the system was modeled in MATLAB/Simulink, the results of which showed: a reduction in drive positioning error improvement of system stability to disturbances; a reduction in the transition process time; a reduction in feed fluctuations during drilling.

Key words: electrohydraulic feed drive, position control, control system synthesis, mathematical model, roller cone drilling, drive dynamics, position controller, transient processes.

Хілов Віктор, Мельничук Аліна, Тропанець Андрій. Система керування електрогідравлічним приводом подачі бурової машини

Метою дослідження є науково обґрунтований підхід до синтезу позиційної системи управління гідравлічним приводом подачі станка шарошечного буріння, який забезпечує підвищення точності позиціонування, стабільність перехідних процесів та ефективність роботи приводу в умовах змінних навантажень, властивих технологічному процесу буріння.

Дослідження здійснено на підставі застосування диференціальних рівняння динаміки гідравлічного привода (використовуються рівняння, що описують рух виконавчого гідроциліндра, динаміку тиску в порожнинах, витрату робочої рідини та пружні властивості гідролінії); лінеаризації нелінійних рівнянь (для аналізу стійкості та синтезу регулятора гідравлічна система наводиться до лінеаризованої моделі в околицях робочої точки); моделювання із застосуванням передавальних функцій та структурних схем;

застосовуються перетворення Лапласа під час формування передавальних функцій приводу та регуляторів для аналізу системи в частотній та часовій областях; методи теорії автоматичного керування (аналіз стійкості; вибір структури регулятора; синтез П-, ПІ-, ПІД-регуляторів за позиційного регулювання); оптимізаційні методи синтезу для розрахунку параметрів регулятора, що дають можливість задати бажані власні значення замкнутої системи та забезпечити необхідну точність позиціонування приводу. моделювання в MATLAB/Simulink (застосовується для верифікації отриманої математичної моделі та перевірки роботи синтезованого алгоритму керування).

За результатами виконаних теоретичних та експериментальних досліджень отримано такі наукові та практичні результати: розроблено математичну модель гідравлічного приводу подачі станка шарошкового буріння, що враховує нелінійні характеристики гідроапаратури, стисливість робочої рідини, гідравлічні втрати та динаміку виконавчого гідроциліндра. Модель дала можливість дослідити вплив параметрів системи на точність позиціонування; виконано аналіз динамічних властивостей приводу та визначено основні фактори, які обмежують точність та швидкість системи позиційного керування, зокрема гідравлічні затримки, силові збурення від процесу буріння та коливання тиску в гідролініях; проведено синтез позиційної системи управління з використанням методів теорії автоматичного керування; на основі лінеаризованої моделі обґрунтовано вибір структури регулятора та визначено його оптимальні параметри; запропоновано алгоритм позиційного регулювання подачі, який забезпечує стабільні перехідні процеси та високу точність відпрацювання заданого положення виконавчого органу в умовах змінних навантажень; розроблено структурну схему системи управління, що має модуль зворотного зв'язку, коригувальні ланки та виконавчий гідропривід, та підтверджено її працездатність за допомогою моделювання; проведено моделювання роботи системи в MATLAB/Simulink, результати якого показали: зменшення похибки позиціонування приводу, покращення стійкості системи до збурень, скорочення часу перехідного процесу, зниження коливань подачі під час буріння.

Ключові слова: система керування, буровий станок, електрогідравлічний привід подачі.

Introduction. Roller-cone drilling machines are widely used in the mining industry for drilling holes and drilling holes in rocks of various types. The efficiency of their work is largely determined by the accuracy and stability of the drilling tool feed, while this very parameter affects the energy efficiency of the rock excavation process, the life of the tool and versatility of technological operations. In most industrial designs, the feed functions are implemented using an additional hydraulic drive, which, regardless of high energy consumption and power output, is characterized by the following characteristics: non-linearities, dynamic movements and sensitivity to changes in direction [1].

Traditional hydraulic feed control systems typically use simple control schemes that provide limited ability to accurately position the actuator, especially in conditions of varying rock hardness and operating pressure fluctuations. As a result, the systems lose accuracy, increase transients, and cause oscillations, which reduces drilling productivity and increases wear on drive components.

In this regard, the synthesis of a modern positional control system for the hydraulic feed drive is relevant, which would ensure stable operation of the drive, increased positioning accuracy and resistance to external disturbances. To solve this problem, it is necessary to create an adequate mathematical model of the hydraulic drive, analyze its dynamic properties and develop an effective control law considering nonlinearities and the specifics of the drilling technological process.

The article presents the results of the synthesis of a positional control system for the hydraulic

drive of a roller cone drilling machine, provides a mathematical model of the drive, justifies the choice of the regulator structure, and demonstrates the effectiveness of the proposed approach using computer modeling.

Research material and method. The automation of technological processes for SBSH-250N roller cone drilling machines used in explosive drilling operations at Kryvbas quarries requires the development of automated control systems for feed and rotation mechanisms [2].

The feed mechanism is designed to create and regulate the axial load and speed of the bit when the drill rod needs to be moved along the length of the rod.

During drilling, the axial force and speed of the drilling tool on the SBSH-250N machine are controlled by a hydraulic drive using distribution spools and hydraulic throttles installed in the injection and discharge lines. The spools and hydraulic throttles are controlled by electromagnetic coils, in which a proportional dependence of the thrust force on the coil rod on the control current supplied to the coil is implemented [3].

The hydromechanical feed drive with an electrical control system is divided into two parts: the control object and the control device. By the control object we mean the executive hydromechanical device with the observed coordinates: pressure in the cylinders, linear speed of movement, path of movement of the rod. The electrical control device controls the coordinates of the control object. The input of the control system is fed with influences that determine the required amount of movement.

The control device, based on information about the processes in the control object, influences the hydraulic drive in order to transfer the control object from the initial state to the final state, in accordance with the restrictions imposed by the drilling technological process.

The drilling process is characterized by low linear speeds of movement. If it is necessary to build up the rod to the length of the next drilling rod, the rotator carriage rises at a speed that exceeds the drilling speed by three orders of magnitude [4; 5].

To solve the problem of synthesis and analysis of the control system, we will build a mathematical model of a hydromechanical drive, which includes: control signal amplifiers U_v , U_n , electromagnets EM_v , EM_n , hydraulic systems GS_v , GS_n (where the indices "v" and "n" denote the upper and lower cavities of the cylinders), inertial masses of the piston of the rod M_c , rope-and-pulley system K_P , Fig. 1.

Fig. 1 shows: T_v , T_n , T – pressure in the upper and lower cavities of the cylinders, total pressure on the drive piston; V_p , V_c – linear velocities of the piston and rod; L_p , L_c – linear displacements of the piston and rod.

The initial diagram, Fig. 1, corresponds to the mathematical model of the positional system control object, Fig. 2.

The structural diagram, Fig. 2, indicates: K_{uv} , K_{un} , K_{emv} , K_{emn} , K_{gsv} , K_{gsn} – transmission coefficients of amplifiers, electromagnets, hydraulic systems of the upper and lower cavities of the cylinders; T_{uv} , T_{un} , T_{emv} , T_{emn} , T_{gsv} , T_{gsn} – time constants of amplifiers, electromagnets and hydraulic systems; M_p , M_s – masses of pistons and the rod; C – rope stiffness coefficient; d , β – coefficients that determine the viscous friction force of the pistons in the cylinder and the braking friction force in the rope; K_c – proportionality coefficient of the rock destroyed by drilling; K_p – coupling coefficient between linear velocity and piston movement; S – locking switch; n – rotation speed of the rod.

In the drilling mode, the difference in forces in the upper and lower regions of the cylinders is applied to the inertial mass of the pistons, part of the force is compensated by viscous friction when the pistons move inside the cylinders of the hydraulic system. In the structural diagram, the rope-pulley system is taken into account as a link with finite stiffness. The elastic force in the rope is proportional to the difference in linear velocities of the pistons and the rod, applied to the inertial mass of the rod. The elastic force as drilling is balanced by the force of resistance to rock destruction.

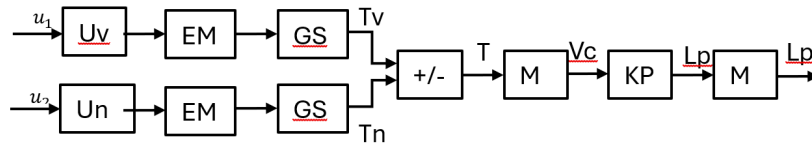


Fig. 1. Functional diagram of the hydromechanical feed drive

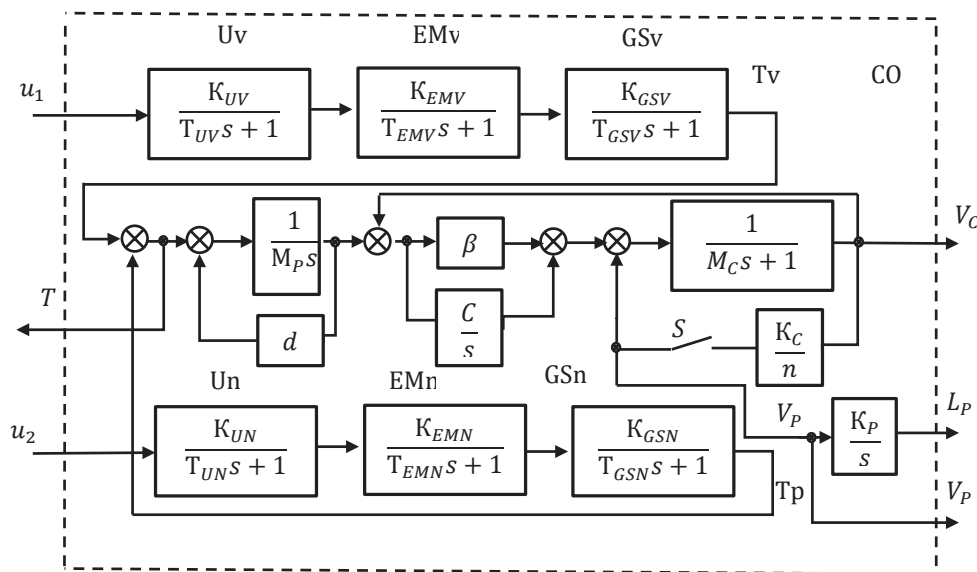


Fig. 2. Structural diagram of the control object

When transporting the rod, there is no force to resist the destruction of the rock. The switch S is open in this mode of operation.

The task of the control system is to move the bit in the rock massif, considering the restrictions, which include limiting the axial forces on the bit, limiting the speed of transporting the rod, limiting the travel path by the length of the rod.

The control object includes three observed coordinates: the difference in forces applied to the pistons T, their linear velocity Vp, and the distance traveled Lp. According to the number of controlled coordinates, the control system must contain three control loops: pressure, linear velocity, and displacement.

Fig. 3 shows a three-loop sequential control system with active correction of the dynamic characteristics of the controlled object. The figure shows: WPP(s), WPS(p), WPD(p) – transfer functions of position, linear piston speed, and pressure controllers; KD, KS, KSP – transfer coefficients of pressure (SD), speed (SS), and position (SP) sensors; TD, TS, TP – time constants of sensor filters; RBP, RBD – referent blocks position and pressure in the delivery line of the hydraulic system; P1, P2, P3, P4 – inverting relay elements.

The need to introduce relay elements is related to the peculiarities of the hydraulic system. The pressure on the piston is formed as the difference in pressure in the upper and lower volumes of the hydraulic cylinders. One of the volumes is connected directly to the pressure line, and the pressure in it is not regulated, while the pressure in the other volume is controlled by a pressure regulator. The latter volume of the hydraulic cylinder is connected to the drain line.

Each loop has a separate controller that is adjusted according to the transfer function of the controlled object. Since the loops of the system are connected in series, their time constants increase from the inner loop to the outer one. The input of each controller receives signals of the setpoint and actual value of the controlled parameter, with the previous controller generating a setpoint signal for the next controller. With such a cascade connection of control amplifiers, it is quite easy to limit the controlled coordinates of the control system [6; 7; 8].

Pressure regulator. The internal control loop in the control system is a loop that controls the pressure difference in the hydraulic cylinders, which is applied to the cylinder pistons. Connecting the pressure difference regulator ensures control of the resulting pressure. Transfer function of the circuit control object.

$$W_{01}(s) = W_{k1}(s)W_{n1}(s) = K_U \frac{K_{EM}}{T_{EM}s + 1} \frac{K_{GS}}{T_{GS}s + 1} K_D \left(\frac{1}{T_U s + 1} \frac{1}{T_D s + 1} \right), \quad (1)$$

where $W_{k1}(s)$, $W_{n1}(s)$ – transfer functions of the compensated and uncompensated parts of the control object (the uncompensated part is indicated in brackets). The indices of the upper- and lower-cylinder volumes are omitted.

Transfer function of the pressure regulator

$$W_{PR}(s) = \frac{1}{sT_{01}W_{k1}(s)} = \frac{(T_{GS} + T_{EM})s + 1}{sa_D(T_U + T_D)K_U K_{EM} K_{GS} K_D}, \quad (2)$$

where T_{01} – pressure loop integration time constant; a_d – loop tuning coefficient ($a_d = 2$ when tuning the loop to the modular optimum).

Transfer function of a closed optimized pressure loop

$$W_{CD}(s) = \frac{1/K_D}{a_d \sigma_D s + 1}, \quad (3)$$

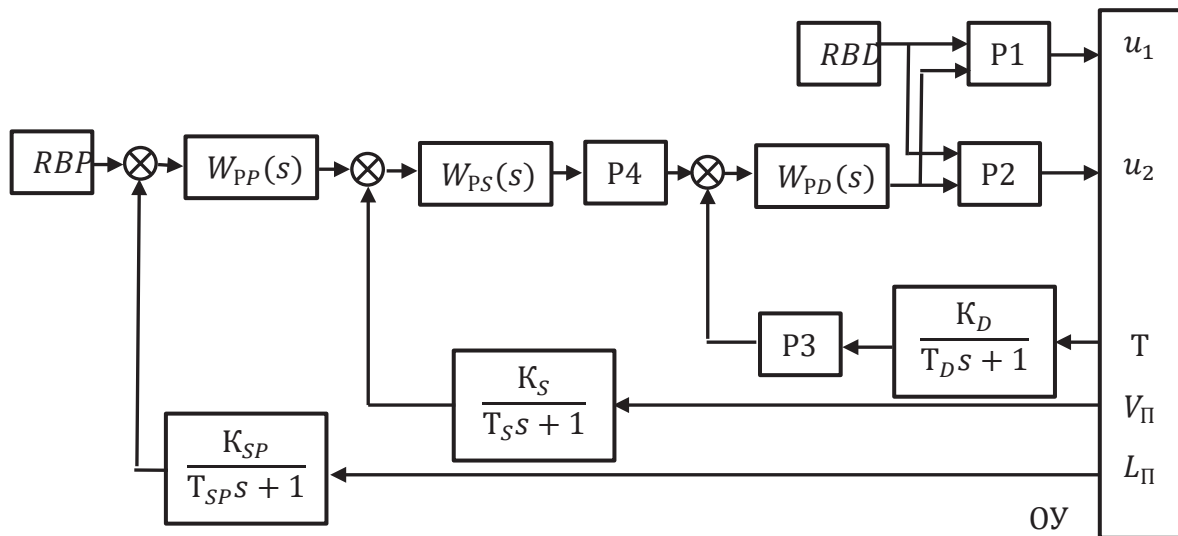


Fig. 3. Structural diagram of the control system

where $\sigma_D = T_U + T_D$ sum of small-time constant pressure loop.

Linear speed controller. External to the pressure difference control loop in the cylinders is the linear speed control loop for the pistons. Transfer function of the linear speed control loop control object

$$W_{02}(s) = W_{k2}(s)W_{n2}(s) = \frac{1}{K_D} K_S \frac{1}{M_P s + d} \left(\frac{1}{a_D \sigma_D s + 1} \frac{1}{T_S s + 1} \right), \quad (4)$$

де $W_{k2}(s), W_{n2}(s)$ – transfer functions of the compensated and uncompensated parts of the control object (the uncompensated part is indicated in brackets).

The object control does not consider the influence of elastic force in the rope-pulley system.

Transfer function of the speed regulator

$$W_{SR}(s) = \frac{1}{s T_{02} W_{k2}(s)} = \frac{K_D d (1 + s M_P / d)}{s a_S (a_D \sigma_D + T_S) K_S}, \quad (5)$$

where T_{02} – integration time constant of the speed loop; a_S – loop tuning coefficient ($a_S = 2$ when tuned to the modular optimum).

Transfer function of the closed optimized speed loop

$$W_{CS}(s) = \frac{1 / K_S}{a_S \sigma_S s + 1}, \quad (6)$$

where $\sigma_S = a_S \sigma_D$ sum of small-time constant speed loop.

To obtain a sign-changing characteristic VP(T) at positive pressures in the upper and lower areas of the hydraulic cylinders, four relay elements P1, P2, P3, P4 are introduced into the control system, which are switched according to the sign of the output voltage of the speed regulator. At a positive output voltage, the relay elements transmit control signals from the input to the output directly, and when the sign of the voltage at the output of the speed regulator changes, the control signals invert the sign to the opposite by switching on the inverter relay elements.

Linear motion controller. The outer contour of the control system is the contour for controlling the movement of the rod. Transfer function of the control object of the movement loop

$$W_{03}(s) = W_{k3}(s)W_{n3}(s) = \frac{K_P K_D}{K_S} \left(\frac{1}{\sigma_S s + 1} \frac{1}{T_P s + 1} \right), \quad (7)$$

where $W_{k3}(s), W_{n3}(s)$ – transfer functions of the compensated and uncompensated parts of the control object (the uncompensated part is indicated in brackets).

Transfer function of the position controller

$$W_{SR}(s) = \frac{1}{s T_{03} W_{k3}(s)} = \frac{K_S}{a_P (a_S \sigma_S + T_P) K_P K_{SP}}, \quad (8)$$

where $a_P = 2$ – position loop tuning coefficient.

To verify the correctness of the technical decisions made and to evaluate the effectiveness of the synthesized hinge position control system, mathematical modeling of the parameters of the SBSH-250MN drilling coil machine was performed (hinge weight 3 t; piston weight 0.9 t; fourfold rope-block system; rope 19.5-G-1-N-O-170 with a diameter of 19.5 mm with stiffness coefficients $C = 1000$ and dissipative forces $\beta = 100$, breaking force 20 t; pressure in the hydraulic system supply system 30 t; viscous friction coefficient of piston movement $d = 2$).

Based on the initial data of the hydromechanical system, the parameters of the control object were calculated and, according to the given methodology, the transfer functions of the pressure, speed, and position regulators were synthesized.

Mathematical modeling of the hydromechanical drive with an electric positioning system showed a significant impact on the dynamics of the system of elastic forces arising in the rope-pulley system. To eliminate increased variability, negative flexible feedback on the linear speed of the piston was introduced at the input of the speed regulator. This measure effectively eliminated the influence of rope compliance on the dynamics of the entire hydromechanical drive.

Oscillograms of developing pressures in the upper Tv and lower Tn areas of the cylinders, as well as the resulting force applied to the pistons of the T cylinders, are shown in Fig. 4. Fig. 5 shows oscillograms of the linear velocities of the piston VP, the rod VC, and the linear displacement of the LC.

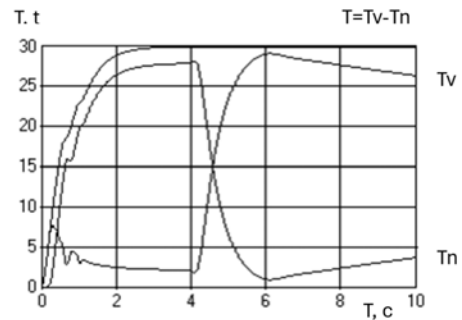


Fig. 4 Oscillograms of pressure changes in hydraulic cylinders

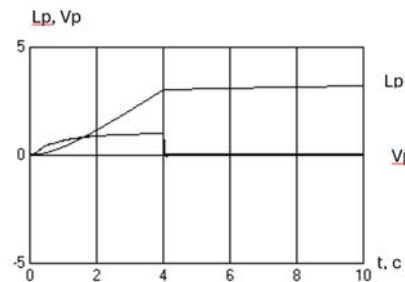


Fig. 5 Oscillograms of piston speed changes (rod), linear displacement of the rod

The process of transporting the rod to the bottom of the hole with a subsequent transition to the drilling process was modeled. From the point of view of the dynamic loads that arise, the selected operating mode is the most unfavorable, since during free movement of the rod, it accumulates a large amount of kinetic energy, which, after the rod hits the bottom, must be effectively damped by a hydromechanical drive with an electric positioning system.

As follows from the curves describing the transition process in the hydromechanical drive, in the process of transporting the pond to the face, acceleration is carried out with a limitation of linear speeds due to the saturation of the position controller. The pressure in the upper and lower cavities of the cylinders differs slightly, which provides the necessary effort to move the inertial masses of the pond and pistons. Some fluctuation in the linear speed of the pistons is explained by the significant influence of the elastic connection of the rope between the inertial masses. When reaching the face pond ($t = 4$ s), an elastic impact of the bit on the rock being drilled occurs. Fluctuations in the speed of the pond indicate that the pond rebounds from the face after the impact. The linear speeds of the pistons and the pond after reaching the face bit decrease to the drilling speed. The pressure difference in the upper and lower regions of the hydraulic cylinders increases sharply, which ensures the power drilling mode. The maximum pressure on the pond and bit is limited by the control system by controlling whether the maximum output voltage of the linear speed controller is exceeded.

Thus, the synthesized electrical control system for the hydromechanical drive of the rod feed of the roller drilling machine ensures its optimal operating modes with control of the pressure on the face, the speed of the rod movement, and the given path.

Conclusions

1. A mathematical model of the hydraulic feed drive has been developed, which considers the nonlinear characteristics of the hydraulic system, the compressibility of the working fluid, the dynamics of the hydraulic cylinder and the influence of the load from the drilling process. The model provides the ability to adequately reproduce the dynamics of the drive under conditions of variable operating modes.

2. The analysis of the dynamic properties of the system was performed and the key factors limiting the accuracy and speed of positional control were identified, including hydraulic delays, pressure fluctuations, power disturbances and nonlinearity of the flow through the throttling elements.

3. A positional control system for a hydraulic feed drive was synthesized, for which the choice of the regulator structure was justified, and the optimal parameters were determined. The proposed control law provides the necessary indicators of stability, accuracy and quality of transient processes

4. A structural diagram of a control system using position feedback has been developed, which provides compensation for external disturbances and stabilization of the actuator movement during drilling.

5. A computer simulation of the system operation has been carried out in MATLAB/Simulink, the results of which confirm the effectiveness of the developed system. A reduction in positioning error, a reduction in the transient process time, and an improvement in drive stability compared to traditional control schemes have been obtained.

6. The practical significance of the research lies in the possibility of applying the proposed approach in drilling rig automation systems to increase feed accuracy, reduce drilling tool wear, and improve the overall efficiency of drilling operations.

BIBLIOGRAPHY:

1. Лисенко С. П. Електричні приводи бурових верстатів : навчальний посібник. Львів : ЛНУ, 2019. 148 с.
2. Жученко А. І., Ладієва Л. Р., Піргач М. С., Жураковський Я. Ю. Математичне моделювання процесів і систем : навчальний посібник. Київ : КПІ, 2017. 351 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/16799921-0872-4776-b522-2cd34d2ac13a/content>.
3. Khilov V. S., Dyfort V. V., Pavlbshina O. Y. Dynamic parameters determination of the hydro-mechanical system electric drive control object. *Scientific journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical sciences*. 2025. No. 3. P. 102–109. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-13>.
4. "Application of Direct Torque Control (DTC) in the Drilling System of Electric Drilling Tool" – part of the proceedings of IFEDC 2023, published in 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0256-5_75.
5. "Electrotechnical Complex of Drill Rig with Adjustable Electric Drives" – MATEC Web of Conferences, 2017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711301012>.
6. Khilov V. S. Automated control of drives for open pit drilling rigs. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 1. С. 67–72. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-10>.

7. Khilov V. S., Dyfort V. V., Pavlbshina O. Y. Dynamic parameters determination of the hydro-mechanical system electric drive control object. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 3. С. 102–109. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-13>.

8. Khilov V. S., Dyfort V. V., Pavlbshin S. V., Pavlbshina O. Y. Constraction principles of roller-bit drilling rigs drive systems for Rryvyi Rih quarries. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 4. С. 143–147.

REFERENCES:

1. Lysenko, S. P. (2019). *Elektrychni pryvody burovykh stankiv: navchalnyy posibnyk* [Electric drives of drilling workbenches: Basic Guide]. Lviv: LNU, 148 p. [in Ukrainian].

2. Zhuchenko, O. I., Ladiyeva, L. R., Pirhach, M. S., & Zhurakovskyy, Ya. Yu. (2019). *Matematychnye modelyuvannya protsesiv i system: navchalnyy posibnyk* [Mathematical modeling of processes and systems: Basic Guide]. Kyiv: KPI, 180p. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/16799921-0872-4776-b522-2cd34d2ac13a/content> [in Ukrainian].

3. Khilov, V., Dyfort, V., & Pavlbshina, O. (2025). Dynamic parameters determination of the hydro-mechanical system electric drive control object. *Scientific journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical sciences*, 3, 102–109. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-13>.

4. “Application of Direct Torque Control (DTC) in the Drilling System of Electric Drilling Tool” – part of the proceedings of IFEDC 2023, published in 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0256-5_75.

5. “Electrotechnical Complex of Drill Rig with Adjustable Electric Drives”. *MATEC Web of Conferences*, 2017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711301012>.

6. Khilov, V. (2024). Automated control of drives for open pit drilling rigs. *Scientific journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, 1, 67–72. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-10>.

7. Khilov, V., Dyfort, V., & Pavlbshina, O. Y. (2025). Dynamic parameters determination of the hydro-mechanical system electric drive control object. *Scientific journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, 3, 102–109. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-13>.

8. Khilov, V., Dyfort, V., Pavlbshin, S., & Pavlbshina, O. Y. (2025). Constraction principles of roller-bit drilling rigs drive systems for Rryvyi Rih quarries. *Scientific journal of Metinvest Polytechnics. Series: Technical Sciences*, 4, 143–147.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 28.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 678.686:620.22-022.53:621.891

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-9>EFFECT OF Y_2O_3 ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMER-METAL MM «STAHL 1018» COMPOSITE**Arustamian Artem Serhiiovych,**

Doctor of Philosophy,

Associate Professor at the Department of Material Science and Applied Mechanics

LIMITED LIABILITY COMPANY "TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC"

ORCID ID: 0000-00022351-8502

Dan Leonid Oleksandrovych,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Metallurgy and Metal Processing

State Higher Education Institution «Pryazovskyi State Technical University»

ORCID ID: 0000-0002-1954-4871

This study examines the tribological characteristics and wear mechanisms of the industrial polymer-metal composite MM «Stahl 1018», modified with a fine-dispersed yttrium oxide (Y_2O_3) filler. The research aims to scientifically justify the use of modifiers to enhance the functional properties of metal-polymers used for restoring and protecting friction surfaces of industrial equipment under intense abrasive wear.

The microstructure and morphology were analyzed using scanning electron microscopy. The results revealed a heterogeneous structure consisting of irregular particles of various sizes, ensuring strong mechanical interlocking. Energy-dispersive X-ray spectroscopy identified a complex chemical composition (Fe, Cr, Al, Si, Y, Ba, and S), confirming uniform filler integration. Raman spectroscopy verified the stability of the polymer matrix, identifying epoxy groups and benzene rings responsible for high adhesion to metallic substrates.

Performance was evaluated through standardized ball-on-disk tribological tests under dry friction conditions. It was experimentally demonstrated that adding 20 vol.% yttrium oxide significantly improves resistance to frictional wear. The specific volumetric wear rate was found to be $W = 600.6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, indicating high wear resistance. These findings confirm the technical efficiency of the modified MM «Stahl 1018» for the repair and renovation of components operating under severe service conditions.

Key words: polymer-metal composite, MM «Stahl 1018», yttrium oxide, tribological properties, wear resistance, SEM, Raman spectroscopy.

Арустамян Артем, Дан Леонід. Вплив Y_2O_3 на трибологічні властивості полімер-металевого композиту MM «STAHL 1018»

У цій науковій праці представлено результати комплексного експериментального дослідження трибологічних характеристик та механізмів зносу промислового полімер-металевого композиційного матеріалу марки MM «Stahl 1018», модифікованого шляхом введення дрібнодисперсного наповнювача у вигляді оксиду ітрію (Y_2O_3). Актуальність роботи зумовлена необхідністю наукового обґрунтування вибору модифікаторів для покращення функціональних властивостей металополімерів, які широко застосовуються в інженерній практиці для відновлення геометричних параметрів та захисту поверхонь тертя промислових агрегатів.

За допомогою методу сканувальної електронної мікроскопії було проведено детальний аналіз мікроструктури та морфології отриманого композиту. Встановлено, що матеріал має гетерогенну структуру, сформовану з нерегулярних частинок різного розміру, що забезпечує механічне зчеплення в системі. Проведений енергодисперсійний аналіз дозволив ідентифікувати наявність таких хімічних елементів, як Fe, Cr, Al, Si, Y, Ba та S, що свідчить про складний багатокomпонентний склад наповнювача та рівномірність його інтеграції в об'єм полімеру. Застосування методу Раман-спектроскопії дозволило підтвердити стабільність хімічної структури матриці, ідентифікувавши наявність характерних епоксидних груп та бензольних кілець, які відповідають за формування високих адгезійних властивостей матеріалу до металевої основи.

Експлуатаційна оцінка матеріалу проводилася шляхом трибологічних випробувань за стандартизованим методом «куля на диску» в умовах сухого тертя. Експериментально доведено, що модифікація композиту додаванням 20 % за об'ємом оксиду ітрію суттєво підвищує його опір фрикційному зносу. Визначений показник питомого об'ємного зносу на рівні $W = 600,6 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Нм}$ демонструє високу зносостійкість матеріалу та його здатність протистояти інтенсивному абразивному впливу. Отримані результати підтверджують технічну доцільність та ефективність використання модифікованого складу MM «Stahl 1018» для проведення ремонтних робіт та реновації зношених вузлів і механізмів, що працюють у важких умовах експлуатації.

Ключові слова: композит, Y_2O_3 , MM «Stahl 1018», спектроскопія, трибологія.

Introduction. The composite Multimetall (MM) «Stahl 1018» was developed in the early 1990s and has been used for repairing bridge pillars, railroad and highway bridges or canal bridges, machinery parts, etc. Thanks to its good forming properties, the composite can be evenly distributed over the surface to be preserved. Even though the material has been on the market for over 30 years it still requires research, and a few of its properties including tribological properties have not been studied yet. There is very little information in the scientific literature about the application and experimental research on the MM «Stahl 1018» composite. Few available publications reporting the results of experimental research [1–5] can be found. For example, the authors in [2] determined the dependence of the proof stress (theoretical yield point) on such factors as height and diameter of the sample. Experimental results for the test specimens showed that the optimal value of the proof stress corresponded to specimens partly fixed in a metal base at a depth of 1 mm. As a result, the maximum compressive strength $\sigma_m=160$ N/mm² was obtained. However, it should be noted that the method of conducting experiments presented in paper [4] has a limited applicability, and the empirical relationship of the proof stress calculated by the authors was approximate ($\sigma_m=160$ N/mm²), which affects the error in determining the value of the theoretical yield point. A. Vorona [5] carried out calculations of the strength of the metal-polymer layer of MM composite «Stahl 1018» under comprehensive compression using the program «SolidWorks 2014» and models «CosmosWorks 2006 [5]. In turn, S. Kalinichenko [6] presented the results of mechanical strength tests of the material under cyclic impact loading. The results of experiments showed that the material can withstand only small impact loads (up to $E=0.5$ J). Under volumetric compression, the strength of the composite under dynamic loading increases many times, and the structure can withstand loads on the load-bearing surfaces of heavily loaded machines, especially rollers on the level of 100 – 200 MPa. The author [6] also determined the elastic modulus and Poisson's ratio for MM material «Stahl 1018» by testing specimens in shear and compression. The value of the obtained modulus of elasticity was 13,200 MPa, staying within the limits established in the technical specifications of the material provided by manufacturer [1]. D. Kakareka [7] experimentally investigated how the material's conditional yield strength depends on such factors as the load amplitude and the method of fixing the composite. Experimental results showed that the maximum stress in the dynamic cycle may exceed

by even 50 % the maximum stress under static loading without deforming the material. Thus, the MM composite «Stahl 1018» can operate without deforming the surface at an average load of $P = 31$ kN and load amplitude of 6 kN. The deformation of samples was observed at a load amplitude of 10 kN and an average load of $P \leq 26$ kN. It was concluded from the experiments that placing the composite in an enclosed volume can increase its strength under asymmetric loading cycle conditions. This means that in structures operating under high vibratory loads the composite should be used in a closed volume or in a reinforced version. It was also established in further experiments that temperature affects the strength of the polymer. At 100 °C the strength of the composite was found to be 42.12 MPa while at 20 °C it rose much higher at 93.63 MPa. At a temperature between 50-60 °C the strength was 61 MPa. At 20 °C, the material practically did not deform, whereas at 100°C the deformation resulted in the destruction of the sample.

Research methods and techniques. MM composite «Stahl 1018» is composed of polymers, with a chemically treated epoxy resin, and powder-fillers consisting of stainless steel (steel 18-10, EN 10088) and ceramics. The composite was modified by Y_2O_3 powder. Macroscopic and microstructural observations of the MM «Stahl 1018» composite were carried out with a «JEOL JSM-5500 LV» microscope. To identify the matrix material, specimens were tested by the Raman spectroscopy technique.

Raman spectra were recorded on an InVia Raman Spectrometer (Renishaw) containing an air-cooled charge-coupled device (CCD) detector and a Leica microscope (x50 objective). The spectral resolution was set at 4 cm⁻¹. The 785 nm line of a diode laser was used as an excitation source. The laser power at the output was set at 10 mW. The typical exposure time for each Raman measurement was 20 s with five accumulations (series of five spectra, each accumulated 20 s = 100 s). The spectra were identical except for small differences (up to 5 %) in some band intensities.)

Tests of the friction coefficient and wear index were performed based on ISO 20808:2016 [8–17]. A tribometer, model T-21, manufactured at the Institute of Exploitation Technology in Radom [9–14], was used for this purpose. The apparatus is used to test the tribological wear of a material using the ball-and-disk method in rotary motion. It makes it possible to determine the tribological properties of materials cooperating during sliding friction. The testing system consists of a rotating disc and a statically fixed anti-sample in the form

of a sphere loaded with a preset force (F) pressing it against the rotating disc. The device is controlled by a computer program that continuously records the results in the form of a series of data for later processing. Experiments were conducted using a normal load of 5N and a rotation speed of 120 rpm. For the experiments specimens were used made of MM composite material «Stahl 1018» with dimensions of 15×15 mm and height $H = 4$ mm. The samples were enriched with Y_2O_3 powder. The samples No. 1, 2, 3 and 4 were added 10 vol%, 20 vol%, 30 vol% and 40 vol% of Y_2O_3 powder, respectively.

Results and discussion. The results of the microstructure study of the MM material «Stahl 1018» modified with Y_2O_3 additive are shown in Fig. 1. The composite contains irregular reinforcing particles with a wide bimodal size range, which are distributed in an epoxy resin-based matrix. The irregular shape of the particles indicates that they were previously produced by a milling process. The microstructure of the composite contains a mixture of particles of different chemical composition, as confirmed by the result of the backscattered electron test (Fig. 1 a and c), where they take on a white to dark graphite color.

Figure 2 shows elemental distribution maps of the analyzed composite material containing O, Cr, Fe, Si, C, Y, Al, S and Ba, respectively. Oxygen, carbon and silicon (Fig. 2 a, e) are located mainly within the matrix of the composite material. Chromium and iron (Fig. 2 b, c) are found within the most abundant, relatively large particles in the composite, and are clearly composed of different phases or solutions. This is confirmed by the bands and areas visible on the map associated with changes in iron concentration (Fig. 2 c). Yttrium and oxygen (Fig. 2 f, a) are localized within the small particles that were introduced into the composite material to increase its resistance to abrasive wear. Aluminum (Fig. 2 g) can be seen within elongated and oval particles, with oxygen and silicon additionally identified in the latter type of particles (Fig. 2 a, d). It is interesting to note that the tested commercial material subjected to modification additionally contains particles made of barium and sulfur (Fig. 2 h, i).

The chemical composition analysis shown in the elemental distribution maps (Fig. 2) reveals that the analyzed reinforced composite is a mixture of particles containing: metal alloys from the Fe-Cr system, metal or alloy containing mainly Al, oxides from the Y-O, Al-Si-O systems and sulfide from the Ba-S system.

Fig. 3 shows the representative Raman spectra of the composite MM, measured at different locations on the surface.

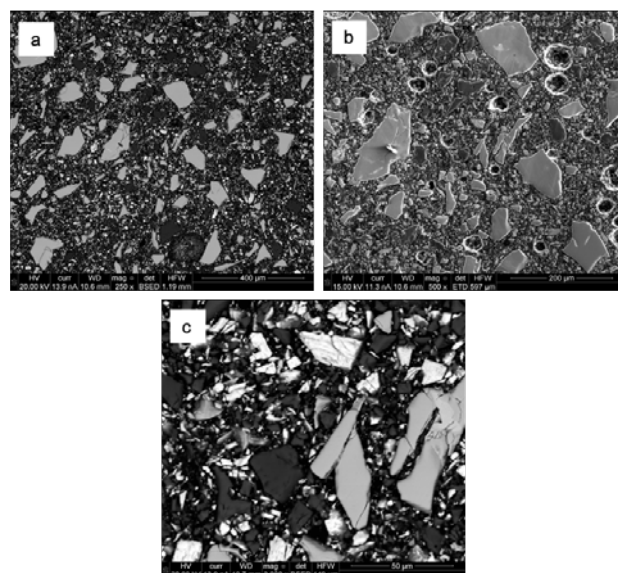


Fig. 1. Microstructure of MM composite «Stahl 1018» modified with Y_2O_3 additives (a, c) – SEM BSED and (b) SEM ETD

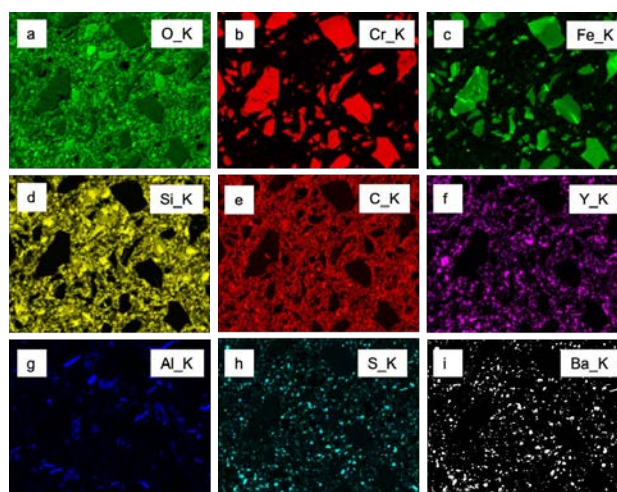
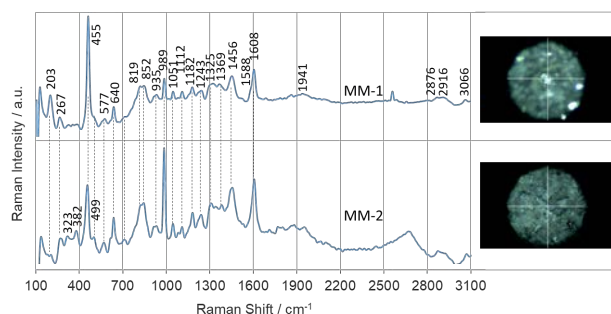


Fig. 2. SEM EDS elemental distribution maps of MM composite material «Stahl 1018» modified with Y_2O_3 additives



axial stretching at the epoxide ring where the C–C bond increases), at 987, at 1243 cm^{-1} (breathing vibration for the C–O–C of the ether bridge), and at 1182 cm^{-1} (C–O stretching vibration of the secondary alcohol or C–H wagging vibration of epoxy resins) [18–22]. Their intensity is weaker at MM-1 than at MM-2, which is probably due to the process of cleavage of epoxy rings [19; 22]. Also noteworthy is the presence of bands associated with the vibrations of the aromatic benzene ring (φ) at 3066 cm^{-1} ($\nu(\text{C–H})_\varphi$), at 1608 and 1588 cm^{-1} ($\nu(\text{C=C})_\varphi$), at 1461 cm^{-1} ($\nu(\text{C=C})$ in p-substituted φ), at 1112 cm^{-1} ($\nu(\text{C–H})_\varphi$ and in-plane epoxy C–H deformation, $\delta_{\text{ip}}(\text{C–H})$), at 852 cm^{-1} ($\nu(\text{C}_3\text{–C}_2)_{\text{skeleton}}$), at 819 cm^{-1} (out-of-plane C–H bending, $\delta_{\text{oop}}(\text{C–H})$), and at 640 cm^{-1} ($\delta_{\text{oop}}(\text{C–H})$) [18; 19; 20; 23; 24]. It should also be noted that the bands at 267, 455, 499, and 1325 cm^{-1} correspond to the vibrations of MgO [25; 26; 27].

The results for sample No. 1 with 10 vol% Y_2O_3 are shown in Figs. 4-5. The test parameters are friction radius – 3 mm; number of cycles – 5,000.

Subsequent experiments for sample No. 1 with 10 vol% Y_2O_3 – are shown in Figs. 6-7. The test parameters are: friction radius – 5 mm; number of cycles – 5,000.

Fig. 4 shows four randomly selected groove profiles obtained by friction with a ball with a 3 mm radius. In another experiment for the same type of sample, the radius of the ball was changed from 3 mm to 5 mm, and the results are shown in Fig. 5. No big difference was observed in the depth and shape of the profiles for these variants, only profile 4 (green) for the case of using a ball radius of 5 mm (Fig. 6) differs by 5 μm , which is within the error limits. The average depth of indentation for specimen 1 after exposure to a ball with a radius of 3 mm, as well as for a ball with a radius of 5 mm, is 26 μm . For these experimental results, the measurement error can be calculated, considering the maximum and minimum peaks of the profile according to formula [28]:

$$\delta = \left[\frac{\Delta x}{x_{\text{max}}} \right] \cdot 100\% = \frac{|x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|}{x_{\text{max}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

where:

δ – relative error, %;

Δx – difference between maximum and minimum peak groove, μm ;

x_{max} – maximum groove height, μm ;

x_{min} – minimum groove height, μm

The following was obtained for the analyzed case: $x_{\text{max}} = -32 \mu\text{m}$, $x_{\text{min}} = -28 \mu\text{m}$. Substituting the obtained values to equation (1), the relative error was produced:

$$\delta = \frac{|-32 - (-28)|}{-32} \cdot 100\% = 12,5\%$$

Fig. 4 shows selected images of the surface from the 3D profilometer for sample No. 1 (friction

radius – 3 mm). The upper part shows the ball itself with scratches on its surface generated during the experiment. Below are two randomly selected sections of the groove on the sample. The upper picture shows green in the middle, indicating that the depth of the groove reached 30 μm , and the lower picture shows a small cutout of purple color, indicating that the depth at this point is 50 μm . Probably there was a homogeneous element in the composite material at this location, but at the time of the experiment this particle was completely removed from the composite. A similar effect was observed in the experiment with a 5 mm radius bead, except that the maximum groove depth was 35 μm . This difference can be explained by the fact that when using a larger diameter ball, the contact area increases, which reduces the pressure, and a larger diameter ball is less likely to extract various inclusions in the composite material.

The results for sample No. 2 with 20 vol% Y_2O_3 are shown in Figs. 8-10. The test parameters are friction radius – 3 mm; number of cycles – 100,000.

The results for sample No. 2 with 20 vol% Y_2O_3 are shown in Figs. 11 – 13. Test parameters: friction radius – 4 mm; number of cycles – 30,000.

The results for sample No. 2 with 20 vol% Y_2O_3 are shown in Figs. 14 – 16. The test parameters are: friction radius – 5 mm; number of cycles – 5,000.

For sample No. 2 (Fig. 9), the coefficient of friction rapidly increases from 0.1 to 0.45, which is due to the use of a special material (liquid silicone) for samples production, but after 6,000 cycles the silicone film was torn and the ball began to slide on the surface of the composite material. In Figs. 10, 13 and 16, a similar result is observed as for specimen No. 1, using a ball with a radius of 3 mm. The maximum depth of the groove was 45 μm (Fig. 8), for 4 mm (Fig. 11), and for 5 mm (Fig. 14) – 25 μm . When a ball with a radius of 4 mm was used (Fig. 13), the coefficient of friction ranged from 0.06 to 0.09, and for a ball with a radius of 5 mm (Fig. 15) from 0.075 to 0.085, but these experiments cannot be taken into account because they were conducted before the experiment with a ball with a radius of 4 mm (Fig. 12) during which a rapid growth in the coefficient of friction was observed.

The results for sample No. 3 with 30 vol% Y_2O_3 are shown in Figs. 17 – 19. The test parameters are: friction radius – 3 mm; number of cycles – 5,000.

Experimental results for sample No. 3 with 30 vol% Y_2O_3 are shown in Figs. 20 – 22. The test parameters are: friction radius – 5 mm; number of cycles – 5,000.

The results for sample No. 4 with 40 vol% Y_2O_3 are shown in Figs. 23 – 25. The test parameters are: friction radius – 3 mm; number of cycles – 5,000.

The results for sample No. 4 with 40 vol% Y_2O_3 are shown in Figs. 26 – 28. The test parameters

are: friction radius – 5 mm; number of cycles – 5,000.

For the samples with the 30% and 40% Y_2O_3 addition, sections of the composite surface are shown in Figs. 19, 22, 25 and 28. As in previous experiments, for sample No. 3 and a ball with a radius of 3 mm, the maximum groove depth was 32 μm (Fig. 17), and the coefficient of friction was 0.48 (Fig. 18). For the same sample but using a ball with a radius of 5 mm, the maximum groove depth was 0.32 μm (Fig. 20), but the coefficient of friction decreased from 0.5 at 1000 cycles to 0.48 at 5,000 cycles (Fig. 21). For specimen No. 4, as for specimen No. 2, an experiment was first conducted with a 5 mm radius ball and a similar effect of a rapid growth in the friction coefficient was observed (Fig. 27) from 0.09 to 0.48, but after 1000 cycles the friction coefficient value dropped to 0.45 after reaching 5,000 cycles. Fig. 23 shows that the maximum groove depth is 0.3 μm , for the sample with 30% Y_2O_3 , and the friction coefficient dropped from 0.5 at 1000 cycles to 0.42 at 5,000 cycles (Fig. 24).

The software used for the ITE Radom T-21 tribotester also allows for the automatic calculation of the roughness of the tested material. The values of the surface roughness parameters of the samples before the tribological test are listed in Table 1.

Table 1

Surface roughness parameter values of samples

Sample No.*	Ra^*	Rz^*
Sample No. 1	0.007071	0.017547
Sample No. 2	0.004148	0.015857
Sample No. 3	0.008860	0.016815
Sample No. 4	0.004284	0.012042

* Sample No. 1 has a 10% Y_2O_3 addition; Sample No. 2 has a 20% Y_2O_3 addition; Sample No. 3 has a 30% Y_2O_3 addition; Sample No. 4 has a 40% Y_2O_3 addition; Ra – is the arithmetic mean deviation from the mean line²⁸; Rz – is the maximum height of roughness according to the measured 10 highest profiles²⁸

The surface roughness of the composite is measured using a pneumatic method, but this method does not provide accurate information. Since the material is polymer-based, its surface is too soft to measure the roughness by traditional methods (optical, pneumatic, interference, etc.). To determine the coefficient of friction, several preliminary tests were carried out, for example, sample No. 2 was tested for 100,000 cycles, but this did not give a clear result, so it was decided to perform 5,000 cycles. The values of the wear index W_v and the average values of the friction coefficient f_{sr} of the samples are listed in Table 2.

Table 2

The value of the wear index W_v and the average value of the friction coefficient f_{sr} of the samples

Sample No.	Parameters	$W_v \cdot 10^{-6}$ mm^3/Nm	f_{sr}
Sample No. 1	R3 5,000 cycles	535.2	-
Sample No. 1	R5 5,000 cycles	537.3	0.422
Sample No. 2	R3 100,000 cycles	54.3	0.220
Sample No. 2	R4 30,000 cycles	0.24	0.077
Sample No. 2	R5 5,000 cycles	0.85	0.079
Sample No. 3	R3 5,000 cycles	526.8	0.457
Sample No. 3	R5 5,000 cycles	600.6	0.457
Sample No. 4	R3 5,000 cycles	450.7	0.458
Sample No. 4	R5 5,000 cycles	373.9	0.347

Conclusions. Based on the research findings for the "Stahl 1018" MM composite modified with yttrium oxide (Y_2O_3), the following expanded conclusions can be formulated.

1. Scanning electron microscopy (SEM) confirmed that the composite consists of irregular reinforcing particles with a wide bimodal size range distributed within an epoxy resin-based matrix.

2. Elemental mapping revealed a complex mixture of particles, including metal alloys from the Fe-Cr system, aluminum-based alloys, yttrium-oxygen (Y-O) and aluminum-silicon-oxygen (Al-Si-O) oxides, as well as barium-sulfur (Ba-S) sulfides.

3. Raman spectroscopy confirmed the presence of characteristic epoxy groups and benzene rings in the matrix, as well as vibrations corresponding to MgO.

4. The addition of 20 vol% yttrium oxide has a positive effect on friction wear resistance, although its overall impact on improving wear resistance is considered minor.

5. For samples with 10 vol% Y_2O_3 , the friction coefficient was approximately 0.51. In samples with 20 vol% Y_2O_3 , the coefficient increased from 0.1 to 0.45 after the initial silicone film was torn during testing.

6. The average indentation depth for the samples was approximately 26 μm . Increasing the radius of the friction ball (from 3 mm to 5 mm) reduces the likelihood of extracting inclusions from the composite due to increased contact area and reduced pressure.

7. The material exhibits high wear resistance, with a maximum determined volumetric wear of $W = 600.6 \cdot 10^{-6} mm^3/Nm$.

8. Under volumetric compression, the material can withstand significant loads on load-bearing surfaces, ranging from 100 to 200 MPa.

9. Strength is highly dependent on temperature; the compressive strength drops from 93.63 MPa at 20

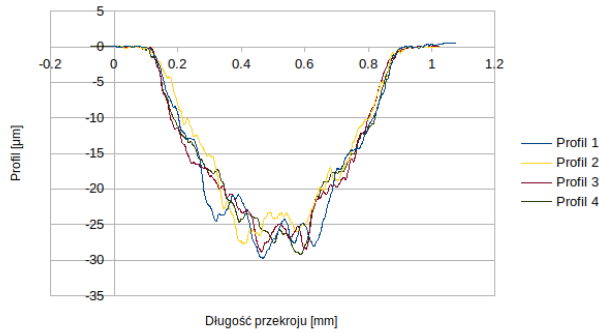


Fig. 4. Measured groove profiles at four points for sample No. 1 with 10 vol% Y_2O_3 , Profile height/Distance – 30 μm /94 m

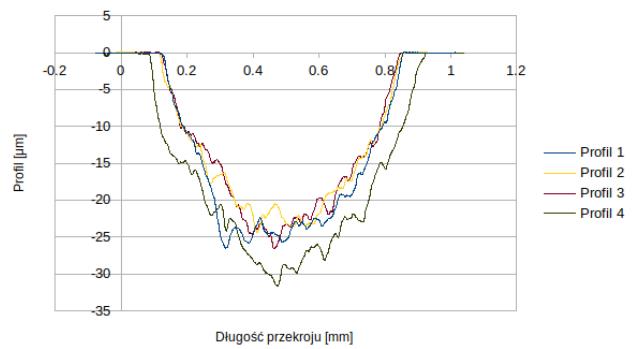


Fig. 6. Measured groove profiles at four locations for sample No. 1 with 10 vol% Y_2O_3

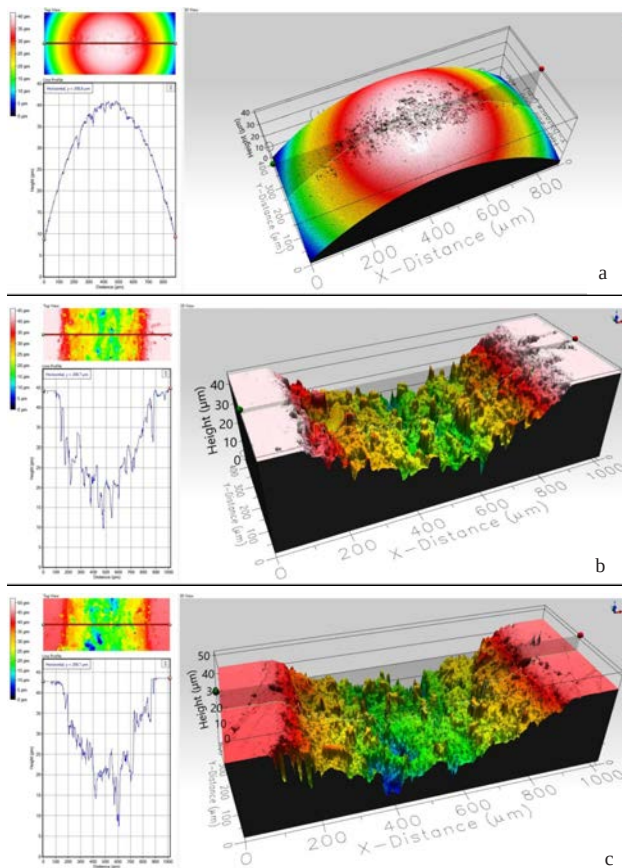


Fig. 5. Selected images of the surface from 3D profilometer for sample No. 1 (friction radius – 3 mm, number of cycles – 5,000). (a) for the anti-sample ball, (b, c) for the surface of the sample

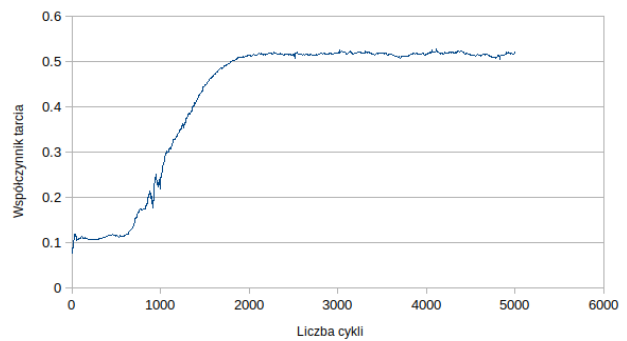


Fig. 7. Change in friction coefficient as a function of the number of cycles for sample No. 1 with 10 vol% Y_2O_3 . Friction coefficient/ No. of cycles – 0.51/5000

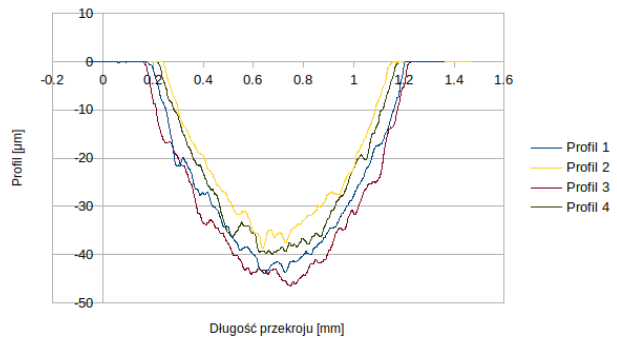


Fig. 8. Measured groove profiles at four locations for sample No. 2 with 20 vol% Y_2O_3

°C to 42.12 MPa at 100 °C. At 100 °C, the material undergoes deformation leading to sample destruction.

10. The composite is highly recommended for the repair and restoration of worn industrial equipment operating under conditions of intense friction.

11. For structures subjected to high vibratory or asymmetric loads, it is advised to use the

composite in an enclosed volume or a reinforced version to increase its strength.

12. While current tests were conducted at 20 °C, further research is suggested for temperatures between 40 °C and 80 °C to better understand its performance in real-world operating environments.

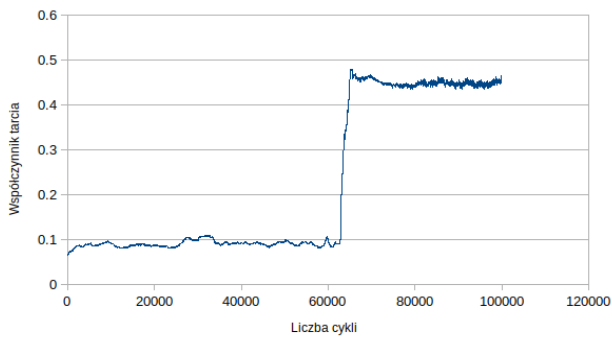


Fig. 9. Change in friction coefficient as a function of the number of cycles for sample No. 2 with 20 vol% Y_2O_3

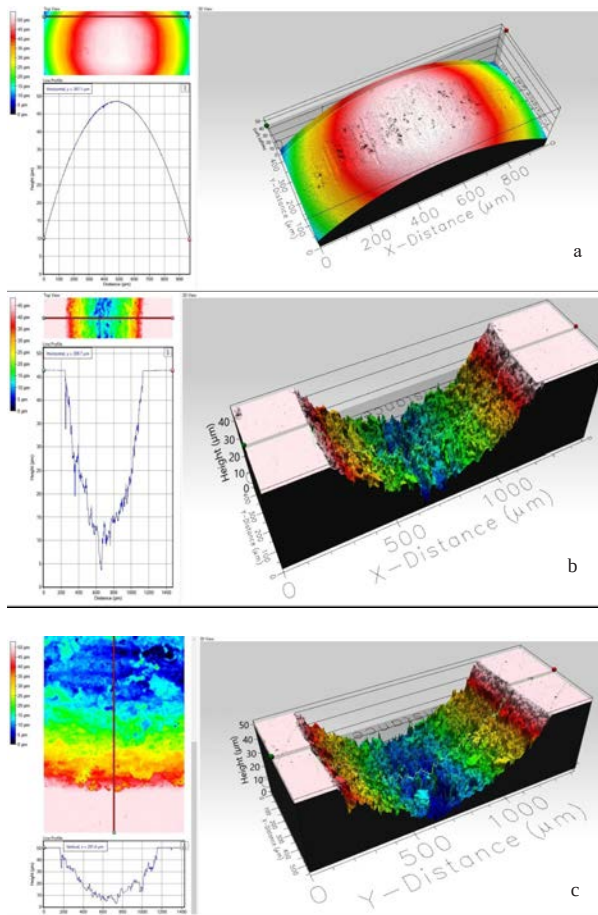


Fig. 10. Selected images of the surface from the 3D profilometer for sample No. 2 (friction radius – 3 mm, number of cycles – 100,000). (a) For the anti-sample ball, (b, c) for the sample surface

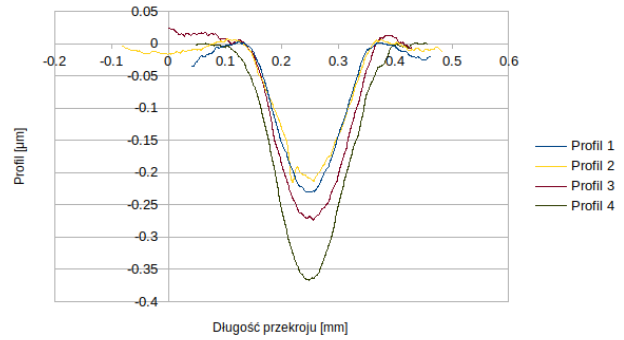


Fig. 11. Measured groove profiles at four locations for sample No. 2 with 20 vol% Y_2O_3

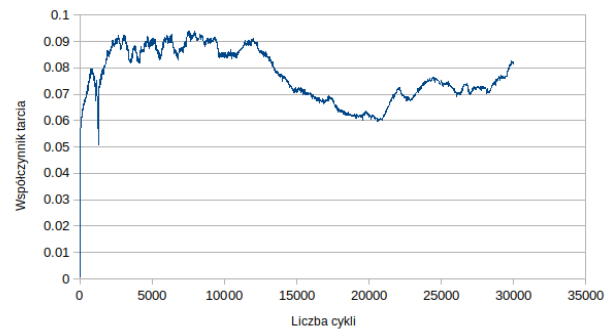


Fig. 12. Change in friction coefficient as a function of the number of cycles for sample No. 2 with 20 vol% Y_2O_3 .

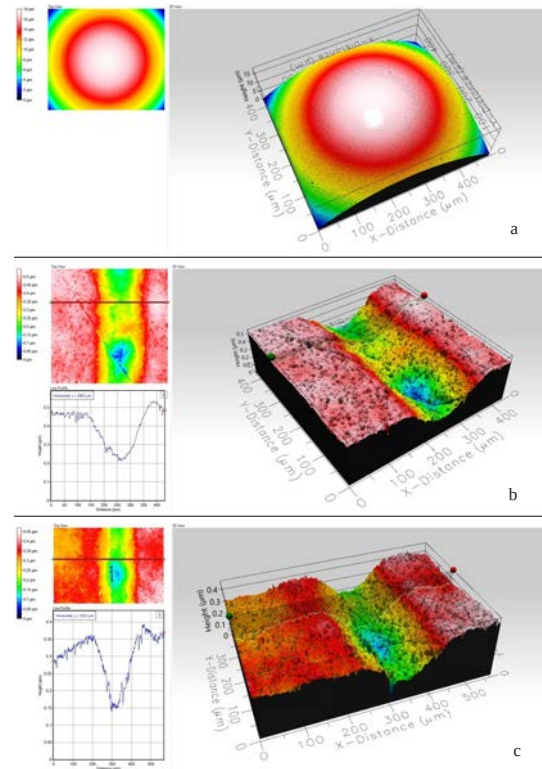


Fig. 13. Selected images of the surface from the 3D profilometer for sample No. 2 (friction radius – 4 mm, number of cycles – 30,000). (a) for the anti-sample ball, (b, c) for the sample surface

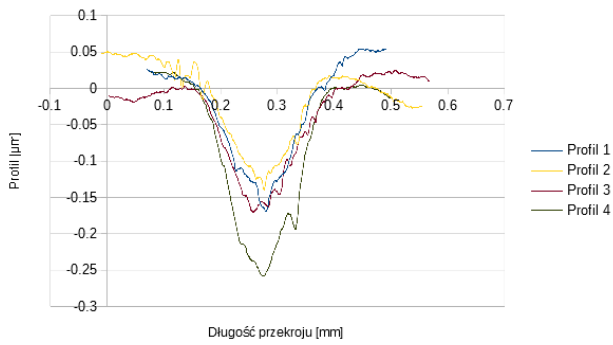


Fig. 14. Measured groove profiles at four locations for sample No. 2 with 20 vol% Y_2O_3

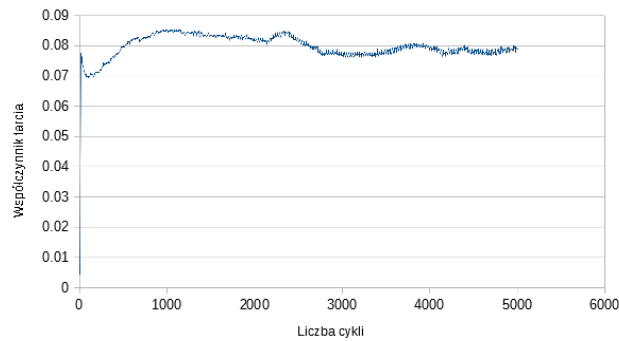


Fig. 15. Change in friction coefficient as a function of the number of cycles for sample No. 2 with 20 vol% Y_2O_3

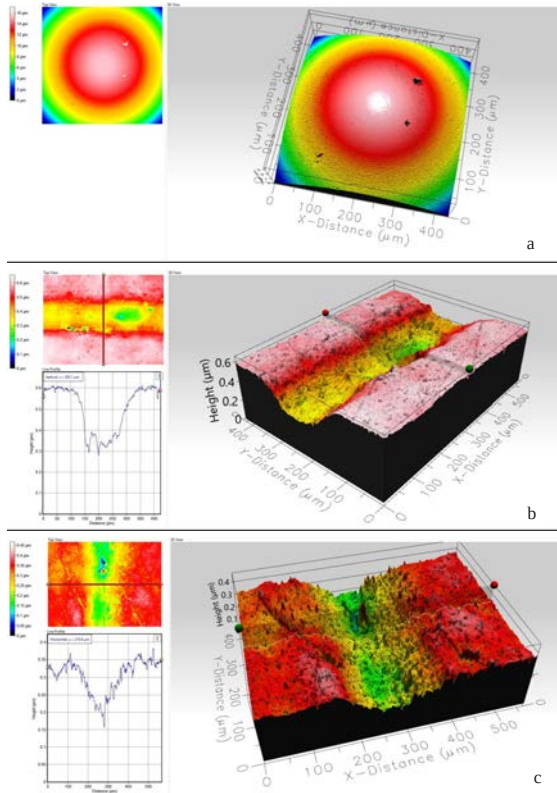


Fig. 16. Selected images of the surface from the 3D profilometer for sample No. 2 (friction radius – 5 mm, number of cycles – 5000). (a) For the anti-sample ball, (b, c) for the sample surface

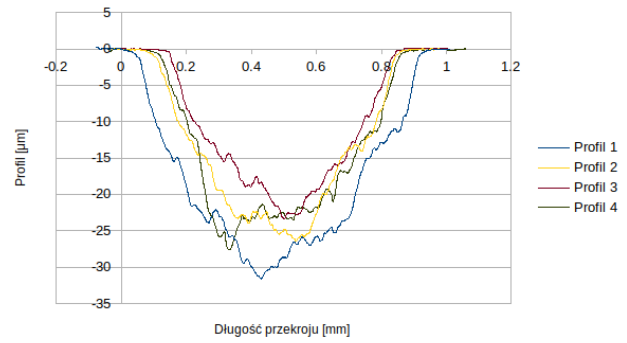


Fig. 17. Measured groove profiles at four locations for sample No. 3 with 30 vol% Y_2O_3

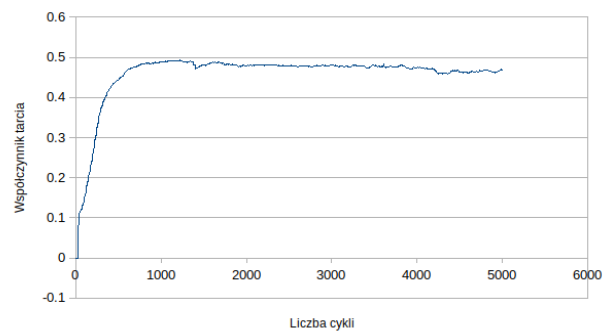


Fig. 18. Change in friction coefficient as a function of the number of cycles for sample No. 3 with 30 vol% Y_2O_3

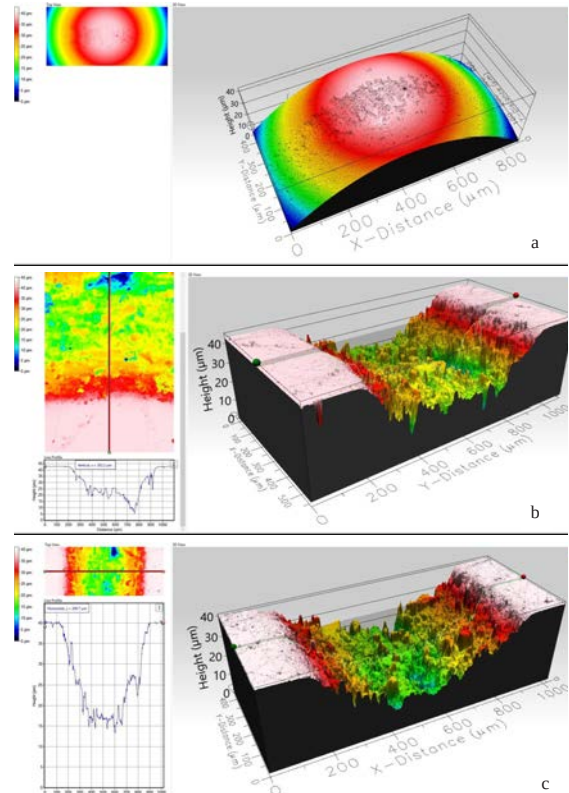


Fig. 19. Selected images of the surface from the 3D profilometer for sample No. 3 (friction radius – 3 mm, number of cycles – 5,000). (a) for the anti-sample ball, (b, c) for the sample surface

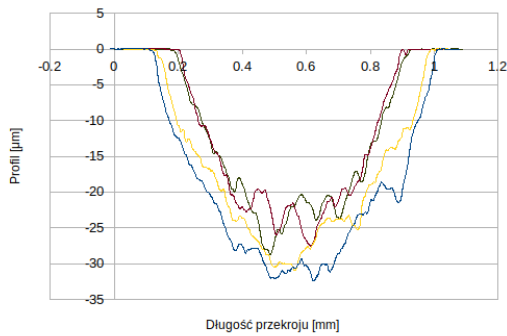


Fig. 20. Groove profiles measured at four locations for sample No. 3 with 30 vol% Y_2O_3

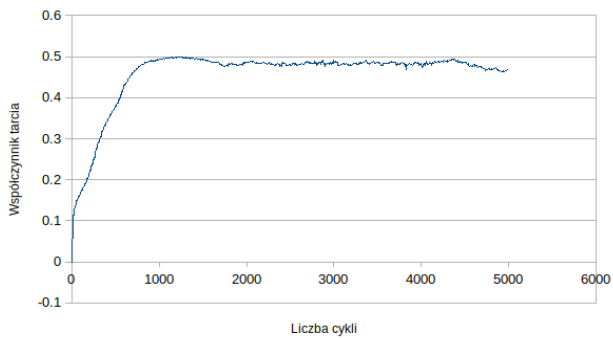


Fig. 21. Change in friction coefficient as a function of the number of cycles for sample No. 3 with 30 vol% Y_2O_3

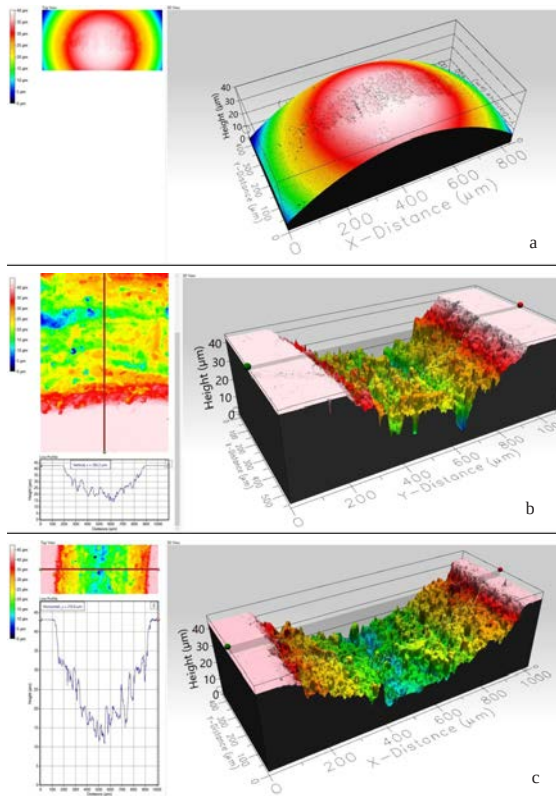


Fig. 22. Selected images of the surface from the 3D profilometer for sample No. 3 (friction radius – 5 mm, number of cycles – 5,000). (a) for the anti-sample ball, (b, c) for the sample surface

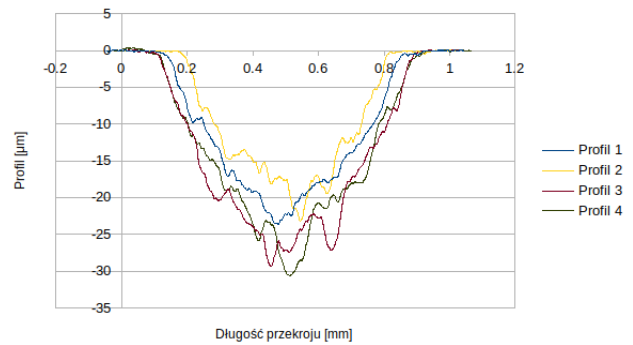


Fig. 23. Measured groove profiles at four locations for sample No. 4 with 40 vol% Y_2O_3

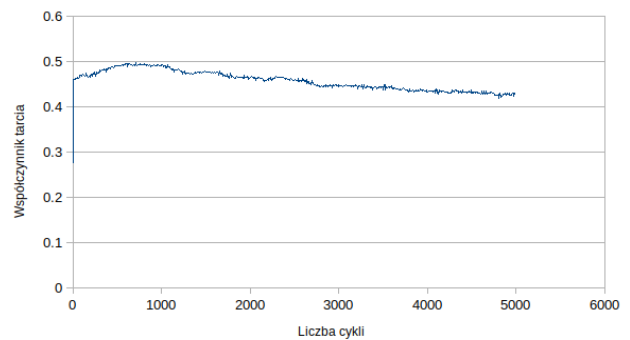


Fig. 24. Change in friction coefficient as a function of the number of cycles for sample No. 4 with 40 vol% Y_2O_3

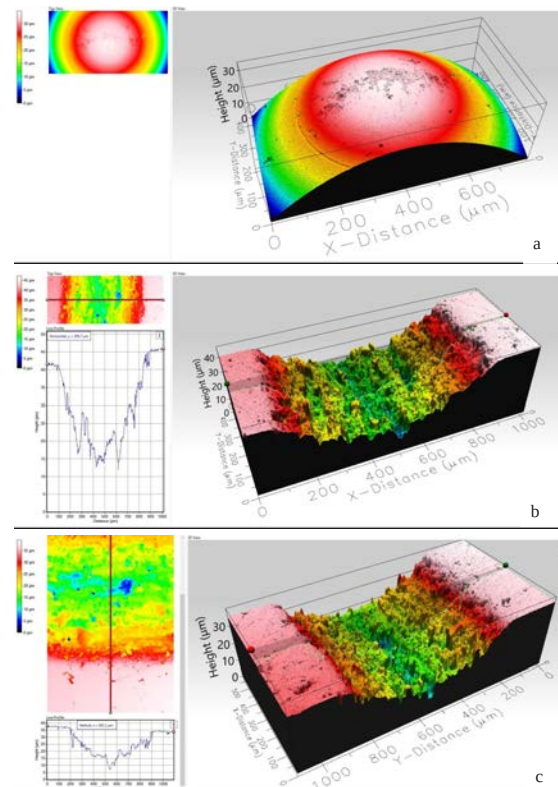


Fig. 25. Selected images of the surface from the 3D profilometer for sample No. 4 (friction radius – 3 mm, number of cycles – 5,000). (a) For the anti-sample ball, (b, c) for the sample surface

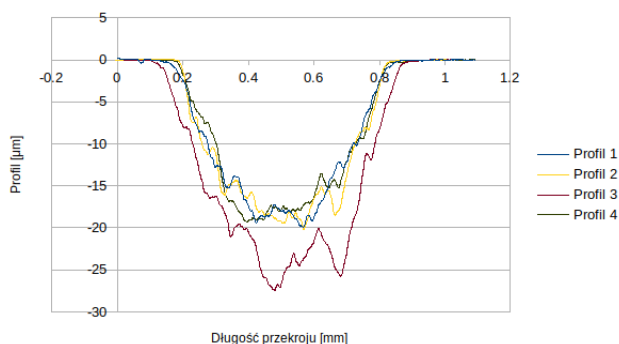


Fig. 26. Measured groove profiles at four locations for sample No. 4 with 40 vol% Y_2O_3

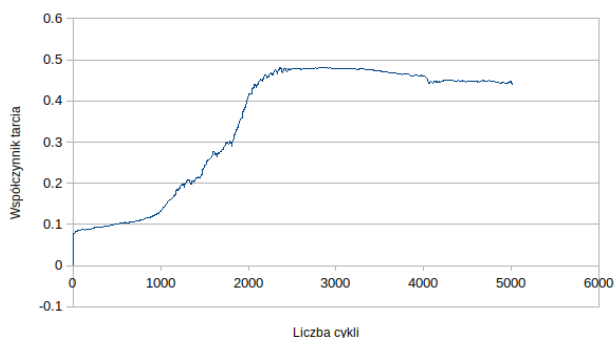


Fig. 27. Change in friction coefficient as a function of the number of cycles for sample No. 4 with 40 vol% Y_2O_3

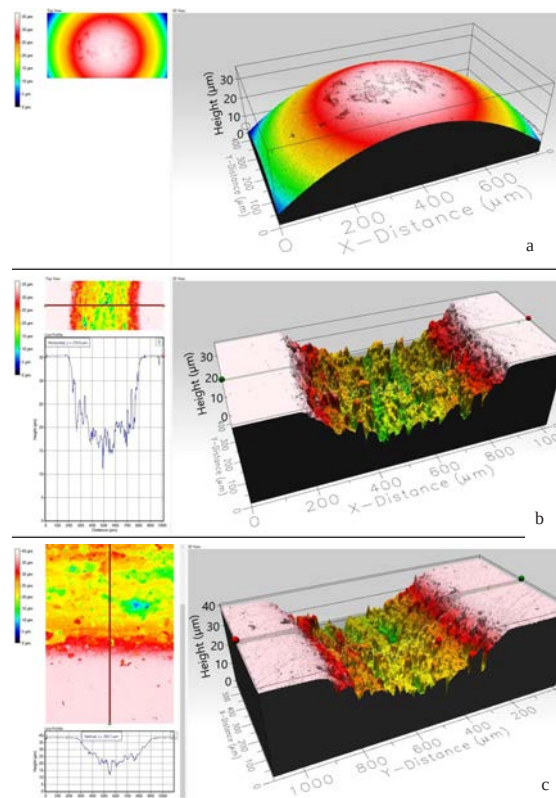


Fig. 28. Selected images of the surface from the 3D profilometer for specimen No. 4 (friction radius – 5 mm, number of cycles – 5,000). (a) For the anti-sample ball, (b, c) for the sample surface

BIBLIOGRAPHY:

1. Ischenko A. A. Technological bases of restoration of the industrial equipment by modern polymeric materials. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*. 2012. Issue 24. P. 27–39.
2. Banat D., Mania R. J. Comparison of failure criteria application for FML column buckling strength analysis. *Composite Structures*. 2016. Vol. 140. P. 806–815.
3. Timoschenko A. V. Research of the mechanical properties of composite materials under dynamic loading : Master's thesis / Priazovskyi State Technical University. Mariupol, 2010.
4. Donev K. V. Investigation of the properties of metalpolymer materials and the development of technology of repair roughing stand : Master's thesis / Priazovskyi State Technical University. Mariupol, 2007.
5. Vorona A. S. Theoretical and experimental research of the mechanical properties of polymer repair materials for different purposes : Master's thesis / Priazovskyi State Technical University. Mariupol, 2009.
6. Kalinichenko S. A. Research of the dynamic properties of metal-polymer materials : Master's thesis / Priazovskyi State Technical University. Mariupol, 2003.
7. Kakareka D. L. Research of the mechanical properties of composite materials under dynamic loading : Master's work / Priazovskyi State Technical University. Mariupol, 2013.
8. Bamford C. H., Tipper C. F. H. *Comprehensive chemical kinetics: Degradation of polymers*. Elsevier, 1975. 535 p.
9. A comparative study of epoxy and polyurethane based coatings containing polyaniline-DBSA pigments for corrosion protection on mild steel / F. B. Diniz et al. *Progress in Organic Coatings*. 2013. Vol. 76, no. 5. P. 912–916.
10. Raman and Near-Infrared Studies of an Epoxy Resin / K. E. Chike et al. *Applied Spectroscopy*. 1993. Vol. 47, no. 10. P. 1631–1635.
11. Contu F., Fenzy L., Taylor S. R. An FT-IR investigation of epoxy coatings as a function of electrolyte composition. *Progress in Organic Coatings*. 2012. Vol. 75, no. 1-2. P. 92–96.
12. FM and XRD Characterization of Silver Nanoparticles Films Deposited on the Surface of DGEBA Epoxy Resin by Ion Sputtering / J. E. de Andrade et al. *Polímeros*. 2013. Vol. 23, no. 1. P. 19–23.

13. A study by Raman, near-infrared and dynamic-mechanical spectroscopies on the curing behaviour, molecular structure and viscoelastic properties of epoxy/anhydride networks / P. Musto et al. *Polymer*. 2007. Vol. 48, no. 13. P. 3703–3716.
14. Effect of UV radiation on some semi-interpenetrating polymer networks based on polyurethane and epoxy resin / D. Rosu et al. *Polymer Degradation and Stability*. 2012. Vol. 97, no. 8. P. 1261–1269.
15. The kinetics of the cure of an advanced epoxy resin by Fourier transform Raman and near-IR spectroscopy / C. J. DeBakker et al. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 1993. Vol. 49, no. 5-6. P. 739–752.
16. Synthesis, structure and thermal properties of montmorillonite/ionic liquid ionogels / A. V. Noskov et al. *RSC Advances*. 2020. Vol. 10, no. 58. P. 34885–34894.
17. A Novel Method to Improve the Anticancer Activity of Natural-Based Hydroxyapatite against the Liver Cancer Cell Line Hep G2 Using Mesoporous Magnesia as a Micro-Carrier / N. S. Awwad et al. *Molecules*. 2017. Vol. 22, no. 11. Art. no. 1947.
18. In vitro evaluation of the toxic effects of MgO nanostructure in Hela cell line / M. W. Akram et al. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. Art. no. 4576.
19. Barbero E. J. Finite element analysis of composite materials using ANSYS. 2nd ed. CRC Press, 2014. 544 p.
20. Barcikowski M. Wpływ materiałów i struktury laminatów poliestrowo-szklanych na ich odporność na uder balistyczny : rozprawa doktorska / Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Szczecin, 2012.
21. Mechanical fatigue degradation of ceramics versus resin composites for dental restorations / R. Belli et al. *Dental Materials*. 2014. Vol. 30, no. 4. P. 424–432.
22. Belzowski A. Metoda oceny stopnia uszkodzenia kompozytów polimerowych. *Kompozyty (Composites)*. 2002. Vol. 2, no. 4. P. 253–258.
23. Benmokrane B., Zhang B., Chennouf A. Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications. *Construction and Building Materials*. 2000. Vol. 14, no. 3. P. 157–170.
24. Durand L. P. Composite materials research progress. Nova Science Publishers, 2008. 317 p.
25. Modeling of MnS precipitation during the crystallization of grain oriented silicon steel / D. Kalisz et al. *Metalurgija*. 2015. Vol. 54, no. 1. P. 139–142.
26. Fejdyś M., Łandwiłt M. Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe. *Techniczne Wyroby Włókiennicze*. 2010. Nr. 1-2. P. 12–22.
27. Gadomski J. Badanie degradacji kompozytu węglowego za pomocą metody tomografii rezystancyjnej : rozprawa doktorska / Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2013.
28. Investigation of in situ and ex situ catalytic pyrolysis of miscanthus × giganteus using a PyGC–MS microsystem and comparison with a bench-scale spouted-bed reactor / D. P. Gamliel et al. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 191. P. 187–196.

REFERENCES:

1. Ischenko, A. A. (2012). *Technological bases of restoration of the industrial equipment by modern polymeric materials*. PSTU (Mariupol), 27–39.
2. Banat, D., & Mania, R. J. (2016). Comparison of failure criteria application for FML column buckling strength analysis. *Composite Structures*.
3. Timoschenko, A. V. (2010). *Research of the mechanical properties of composite materials under dynamic loading* [Master's thesis, PSTU]. Mariupol, Ukraine.
4. Donev, K. V. (2007). *Investigation of the properties of metalpolymer materials and the development of technology of repair roughing stand* [Master's thesis, PSTU]. Mariupol, Ukraine.
5. Vorona, A. S. (2009). *Theoretical and experimental research of the mechanical properties of polymer repair materials for different purposes* [Master's thesis, PSTU]. Mariupol, Ukraine.
6. Kalinichenko, S. A. (2003). *Research of the dynamic properties of metal-polymer materials* [Master's thesis, PSTU]. Mariupol, Ukraine.
7. Kakareka, D. L. (2013). *Research of the mechanical properties of composite materials under dynamic loading* [Master's work, PSTU]. Mariupol, Ukraine.
8. Bamford, C. H., & Tipper, C. F. H. (1975). *Comprehensive chemical kinetics: Degradation of polymers*. Elsevier.
9. Diniz, F. B., De Andradea, G. F., Martins, C. R., & De Azevedo, W. M. (2013). A comparative study of epoxy and polyurethane based coatings containing polyaniline-DBSA pigments for corrosion protection on mild steel. *Progress in Organic Coatings*, 76(5), 912–916.

10. Chike, K. E., Myrick, M. L., Lyon, R. E., & Angel, S. M. (1993). Raman and Near-Infrared Studies of an Epoxy Resin. *Applied Spectroscopy*, 47(10), 1631–1635.
11. Contu, F., Fenzy, L., & Taylor, S. R. (2012). An FT-IR investigation of epoxy coatings as a function of electrolyte composition. *Progress in Organic Coatings*, 75(1-2), 92–96.
12. de Andrade, J. E., Machado, R., Macêdo, M. A., & Cunha, F. G. C. (2013). FM and XRD Characterization of Silver Nanoparticles Films Deposited on the Surface of DGEBA Epoxy Resin by Ion Sputtering. *Polímeros*, 23(1), 19–23.
13. Musto, P., Abbate, M., Ragosta, G., & Scarinzi, G. (2007). A study by Raman, near-infrared and dynamic-mechanical spectroscopies on the curing behaviour, molecular structure and viscoelastic properties of epoxy/anhydride networks. *Polymer*, 48(13), 3703–3716.
14. Rosu, D., Rosu, L., Mustata, F., & Varganici, C.-D. (2012). Effect of UV radiation on some semi-interpenetrating polymer networks based on polyurethane and epoxy resin. *Polymer Degradation and Stability*, 97(8), 1261–1269.
15. DeBakker, C. J., George, G. A., St John, N. A., & Fredericks, P. M. (1993). The kinetics of the cure of an advanced epoxy resin by Fourier transform Raman and near-IR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 49(5-6), 739–752.
16. Noskov, A. V., Alekseeva, O. V., Shibaeva, V. D., & Agafonov, A. V. (2020). Synthesis, structure and thermal properties of montmorillonite/ionic liquid ionogels. *RSC Advances*, 10(58), 34885–34894.
17. Awwad, N. S., Alshahrani, A. M., Saleh, K. A., & Hamdy, M. S. (2017). A Novel Method to Improve the Anticancer Activity of Natural-Based Hydroxyapatite against the Liver Cancer Cell Line Hep G2 Using Mesoporous Magnesia as a Micro-Carrier. *Molecules*, 22(11), 1947.
18. Akram, M. W., Fakhar-e-Alam, M., Atif, M., Butt, A. R., Asghar, A., Jamil, Y., Alimgeer, K. S., & Wang, Z. M. (2018). In vitro evaluation of the toxic effects of MgO nanostructure in Hela cell line. *Scientific Reports*, 8, 4576.
19. Barbero, E. J. (2014). *Finite element analysis of composite materials using ANSYS*. CRC Press.
20. Barcikowski, M. (2012). *Wpływ materiałów i struktury laminatów poliestrowo-szklanych na ich odporność na uder balistyczny* [Doctoral dissertation, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie].
21. Belli, R., Geinzer, E., Muschweck, A., Petschelt, A., & Lohbauer, U. (2014). Mechanical fatigue degradation of ceramics versus resin composites for dental restorations. *Dental Materials*, 30(4), 424–432.
22. Belzowski, A. (2002). Metoda oceny stopnia uszkodzenia kompozytów polimerowych. *Kompozyty (Composites)*, 2(4), 253–258.
23. Benmokrane, B., Zhang, B., & Chennouf, A. (2000). Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications. *Construction and Building Materials*, 14(3), 157–170.
24. Durand, L. P. (2008). *Composite materials research progress*. Nova Science Publishers.
25. Kalisz, D., Żak, P. L., Lelito, J., Szucki, M., Suchy, J. S., & Gracz, B. (2015). Modeling of MnS precipitation during the crystallization of grain oriented silicon steel. *Metalurgija*, 54(1), 139–142.
26. Fejdyś, M., & Łandwajt, M. (2010). Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe. *Techniczne Wyroby Włókiennicze*, 12–22.
27. Gadowski, J. (2013). *Badanie degradacji kompozytu węglowego za pomocą metody tomografii rezystancyjnej* [Doctoral dissertation, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej].
28. Gamliel, D. P., Du, S., Bollas, G. M., & Valla, J. A. (2015). Investigation of in situ and ex situ catalytic pyrolysis of miscanthus × giganteus using a PyGC–MS microsystem and comparison with a bench-scale spouted-bed reactor. *Bioresource Technology*, 191, 187–196.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 26.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 621.7; 621 7.043

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-10>

ВПЛИВ ПРОКАТКИ ЗІ ЗСУВОМ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДИСПЕРСНОТВЕРДІЮЧОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

Пашинська Олена Генріхівна,

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,
провідний науковий співробітник ДонФТІ ім. О.О.Галкіна НАН України
ORCID ID: 0000-0001-7102-1544

Пашинський Володимир Володимирович,

доктор технічних наук, доцент,
завідувач кафедри МПМ
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-0118-4748

У роботі представлено результати дослідження впливу прокатки зі зсувом на формування структури та властивостей прокату з алюмінієвого дисперснозміцненого сплаву. Досліджено різницю в мікротвердості, параметрах зеренної структури, тонкої структури (рівня мікронапруг, розміру блоків мозаїки та щільності дислокацій) в зразках, отриманих прокаткою зі зсувом (далі – ПЗ) і стандартною прокаткою (далі – СТ) на гладкій бочці при зіставних ступенях деформації. Установлено, що зі збільшенням ступеня деформації мікротвердість матеріалу зростає приблизно однаково, проте при досягненні логарифмічного ступеня деформації $e \geq 2$ в зразках, отриманих за технологією ПЗ, починаються процеси знеміцнення. Падіння мікротвердості на останньому переході може бути пов'язане з перебігом *in-situ* повернення або рекристалізації в процесі деформації. Характеристики форми зерна суттєво відрізняються, а саме у зразках, отриманих за технологією ПЗ, нерівноосність зерен у напрямку вздовж та поперек прокатки менше, ніж у зразках СТ, що також може пояснюватися активацією процесів рекристалізації та повернення під впливом зсувних деформацій. Дослідження тонкої структури методом рентгеноструктурного аналізу показало, що розмір блоків мозаїки змінюється за тими самими закономірностями. Порівняння величини мікронапруг дає змогу зробити такі висновки: для відповідних обробок мікронапруги в поперечному перерізі менше, ніж у поздовжньому, приблизно на 30 % для СТ і на 50 % – для ПЗ; після обробки СТ величина мікронапруг більше, ніж після прокатки ПЗ на 30 % у поперечному перерізі та на 4 % – у поздовжньому. Отримані результати дають змогу стверджувати, що при реалізації технології ПЗ при досягненні ступеня логарифмічної деформації $e \geq 2$ починається розвиток процесу спрямованої рекристалізації під час деформації.

Ключові слова: деформація зі зсувом, розмір зерна, коефіцієнт форми зерна, мікротвердість, анізотропія, мікронапруги, розмір блоків, щільність дислокацій.

Pashynska Olena, Pashynskyi Volodymyr. Influence of shear rolling on the formation of structure and mechanical properties of a dispersion-strengthened aluminum alloy

The paper presents the results of the study of shear rolling influence on the formation of the structure and properties of metal from a dispersion-strengthened aluminum alloy. The difference in microhardness, grain structure parameters, fine structure (microstress level, mosaic block size and dislocation density) in samples obtained by shear rolling (ShR) and standard rolling (StR) on a smooth barrel at different deformation degrees was studied. It was found that with increasing deformation degree, the microhardness of the material increases approximately equally, however, when reaching a logarithmic deformation degree $e \geq 2$ in samples obtained by ShR technology, weakening processes begin. The drop in microhardness at this degree of deformation may be associated with the start of *in-situ* recovery or recrystallization during deformation. The grain shape characteristics differ significantly, namely, in samples obtained by the ShR technology, the biaxiality of grain size in the direction along and across the rolling is less than in the StR samples, which can also be explained by the activation of the recovery and recrystallization processes under the influence of shear deformations. The study of the current structure by the X-ray structural analysis method showed that the size of the mosaic blocks changes according to the same laws. A comparison of the magnitude of microstresses allows us to draw the following conclusions: for the corresponding treatments, the microstress in the cross section is less than in the longitudinal, by approximately 30% for StR and by 50% for ShR; after StR treatment, the magnitude of microstresses is greater than after rolling with shear by 30% in the cross section and by 4% in the longitudinal. The obtained results allow us to state that when implementing the ShR technology, when the logarithmic deformation degree $e \geq 2$ is reached, the development of the directional recrystallization process begins during deformation.

Key words: shear deformation, grain size, grain shape factor, microhardness, anisotropy, microstress, block size, dislocation density.

Вступ. У роботі представлені результати досліджень, метою яких є вивчення впливу схеми деформації при прокатці зі зсувом (далі – ПЗ) на зміну структури та властивостей алюмінієвого сплаву. Такий вид обробки дедалі частіше застосовують для інтенсифікації процесів формозмінення [1] та отримання підвищених механічних характеристик деформованих металевих матеріалів [2]. Установлено, що зміна напруженого стану активує процеси накопичення та перерозподілу дефектів кристалічної будови, що впливає на перебіг процесів повернення та рекристалізації [3]. Численними дослідженнями встановлено, що процес таких структурних перетворень залежить як від внутрішніх факторів (тип кристалічної решітки сплаву, вихідний структурний стан) [4], так і від реалізації типу технологічного процесу для створення зсувних деформацій під час обробки [4; 5]. Так, наприклад, у роботі [6] досліджується можливість математичного моделювання процесів формування структури в процесі інтенсивної пластичної деформації. Але більшість авторів використовує методи експериментального дослідження структурних перетворень для матеріалів з певним типом кристалічної решітки. Автори роботи [7] досліджували перетворення в сплавах на основі магнію, і зроблено висновок, що інтенсивна пластична деформація активує полегшений розвиток динамічної рекристалізації. Однак магній має гексагональну щільно упаковану кристалічну решітку, тоді як значна кількість технічних сплавів має кубічну гранецентровану кристалічну решітку, тому результати роботи [7] не можуть бути прямо перенесені на такі матеріали. У тих же випадках, коли досліджували структурні зміни в металах з ГЦК решіткою, використовувалася гаряча пластична деформація [8], що утруднювало розділення ефектів температурного та деформаційного впливу при обробці. Значний інтерес становить дослідження структурних перетворень за інтенсивної пластичної деформації сплавів на основі алюмінію, який має ГЦК-решітку, але завдяки високій пластичності може бути деформований за температур значно нижчих температури статичної рекристалізації. Так, у роботі [9] досліджено структурні перетворення при інтенсивній пластичній деформації листа з алюмінієвого сплаву, але автори все-таки застосовували підігрів матеріалу до 200–300 °С, а деформацію проводили на зразку, який розміщувався в гідравлічному пресі. Значно більший інтерес становить технологічна схема, коли деформація реалізується в процесі прокатки за кімнатних температур у спеціально розроблених профільованих

валках [10]. Тому в цьому дослідженні використовували матеріали, отримані саме за такою технологією.

Методи та методики дослідження. Наявність зсувного складника деформації забезпечували прокаткою на профільованих валках (далі – ПЗ) [10]. Для порівняння стандартну прокатку (далі – СП) виконували на гладкій бочці. Деформацію здійснювали без нагріву, щоб уникнути впливу структурних термічно активованих перетворень.

Хімічний склад досліджуваного алюмінієвого сплаву такий (% ваг.): Cu – 3.8–4.8; Mn – 0.4–0.8; Mg – 0.4–0.8; Si 0.7; Fe 0.7.; Al – основа. Пруток діаметром 30 мм відпалювали при температурі 500 °С і гартували у воду. Зразки витримували за кімнатної температури для завершення процесу природного старіння в повному обсязі, протягом 5–7 діб для старіння дюралюмінієвого сплаву після загартування.

Структура сплаву після відпалу становить собою твердий розчин з вторинними включеннями різних інтерметалічних сполук. Після гарту з оптимальних температур (500 °С) основна кількість сполук CuAl_2 та Mg_2Si розчиняється в алюмінії. Однак сполуки заліза не розчиняються, тому його включення спостерігаються в алюмінієвому твердому розчині (рис. 1). Цей стан матеріалу обрано як вихідний для проведення порівняльного аналізу впливу на структуру й властивості алюмінієвого сплаву при різних видах прокатки.

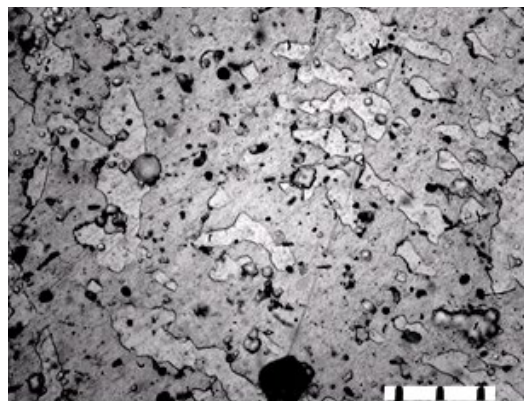


Рис. 1. Мікроструктура алюмінієвого сплаву після загартування (поперечний переріз, $\times 1000$, відстань між поділами 10 мкм)

Мікроструктуру загартованих і деформованих зразків досліджували при збільшеннях 200–3000 на приладі Neophot-32 після багаторазового полірування та двостадійного травлення кордонів зерен розчином ($\text{HF} + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$) та концентрованим розчином ($\text{H}_2\text{O} + \text{HF}$). Фотографування здійснювали цифровою камерою Nikon. На

зразках у поперечному й подовжньому напрямках проводили кількісну оцінку розмірів зерен та їх фрагментів, а також вимірювали мікротвердість при навантаженні 25 г. Статистичну обробку отриманих результатів здійснювали за допомогою програми Statistica 5.5.

На автоматизованій установці ДРОН-3 виконували рентгеноструктурний аналіз зразків у подовжньому й поперечному напрямках після деформації з метою визначення розмірів кристалітів і мікронапруження в кристалах. Метод дав змогу отримати статистично надійну інформацію про параметри решітки, розмір зерен-кристалітів, мікроспотворення, кристалографічні текстури, а також визначити ступінь анізотропії після деформації. Зйомку проводили у випромінюванні заліза. Як еталон прийнятий монолітний зразок з хімічно чистого алюмінію (99,99 %). Після прокатки його піддавали пресуванню, у результаті чого логарифмічний ступінь деформації матеріалу становив $\epsilon = 1.1$. Для зняття внутрішніх напруг, викликаних деформаційною обробкою, та отримання порівняно великого зерна зразок нагрівали до 400 °С протягом 25 хв, після чого охолоджували з відкритою піччю (для виключення виділення вторинних фаз). Зйомка рентгенограми відпаленого зразка була еталонною: порівняння з нею дало змогу розділити ефекти, що роблять внесок у зміну структури при різних типах деформації.

Для контролю властивостей дібрано зразки після деформації за стандартною схемою (зі ступенем деформації $\epsilon = 1.52; 2.01; 2.22; 2.65$) та прокатки зі зсувом ($\epsilon = 0.62; 1.56; 1.94; 2.41$).

Результати. Для оцінки зміни механічних характеристик проведено вимірювання мікротвердості сплаву в різних площинах (уздовж та впоперек напрямку прокатки). На рис. 2 наведено дані щодо зміни значень мікротвердості H_{μ} при підвищенні ступеня деформації за СТ- та ПЗ-технологіями. З аналізу графіка видно, що в зразках після СТ на всіх етапах мікротвердість у поперечному перерізі вище, ніж у подовжньому. Різниця в значеннях H_{μ} для різних перерізів зі збільшенням ступеня деформації зростає ($\Delta H_{\mu} = 20; 30; 35 \text{ Н/мм}^2$), проте на останньому проході зменшується на $\Delta H_{\mu} = 20 \text{ Н/мм}^2$. Для зразків після ПЗ на першому етапі деформування мікротвердість у подовжньому перерізі вище, ніж у поперечному, а на наступних етапах тенденція аналогічна зразкам, прокатаним за СТ-технологією. Зі зростанням ступеня деформації різниця в значеннях для подовжнього та поперечного перерізів збільшується ($\Delta H_{\mu} = 12; 17; 25; 45 \text{ Н/мм}^2$). Загалом, з підвищенням ступеня деформації для всіх

зразків після прокатки зі зсувом спостерігається зростання значень мікротвердості в обох перерізах, тільки на останньому проході після ПЗ вона знижується, причому в подовжньому перерізі значно. На початкових етапах деформації анізотропія мікротвердості при ПЗ менше, ніж при СТ, проте на останньому етапі перевищує анізотропію H_{μ} в стандартних зразках.

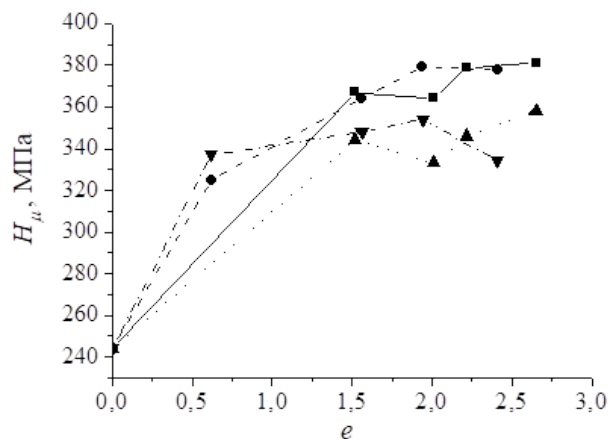


Рис. 2. Залежність мікротвердості від ступеня деформації в поперечному (■ – СТ, ● – ПЗ) та подовжньому (▲ – СТ, ▼ – ПЗ) перерізах

Падіння мікротвердості на останньому проході може бути пов'язане з перебігом in-situ повернення або рекристалізації в процесі деформації. У низці публікацій [5–10] обговорювали питання щодо можливості перебудови дефектної структури в алюмінієвих сплавах при деформації в ділянці низьких та високих температур. У публікаціях зазначається, що внаслідок високої енергії дефекту упаковки в алюмінії найбільш імовірний перебіг повернення, що перешкоджає розвитку рекристалізації. У роботі [9] показано, що при складному навантаженні в алюмінії можливий розвиток складних процесів, що поєднують повернення та рекристалізацію в процесі деформації. Показано, що це призводить до формування структур змішаного типу, для яких характерна наявність зерен із субграницями та дрібних зерен без субграниць, з малою кількістю дефектів у полі зерна, що характеризуються висококутовими границями. Тому питання механізмів перебудови тонкої структури в алюмінієвих сплавах при деформації нині залишається дискусійним.

Однак, незважаючи на різницю в трактуванні природи спостережуваного зменшення, беззаперечним фактом залишається те, що при використанні комбінованої пластичної деформації зі зсувом починаються процеси активної

перебудови структури завдяки не тільки збільшенню щільності дефектів, а і їх еволюції.

Для встановлення природи змін структури, що спостерігаються, використовували методи мікроструктурного кількісного аналізу. При падінні рівня мікротвердості в разі перебігу процесів повернення in-situ розміри зерен не повинні суттєво збільшуватися. Якщо ж при деформації проходить рекристалізація in-situ, то це має знайти відображення в зміні розміру та форми зерна (коефіцієнта витягнутості). Розміри зерен та параметри статистичної обробки результатів наведено в табл. 1.

З даних таблиці видно, що прокатка по СТ і ПЗ технологіях у поперечному перерізі призводить до загального подрібнення структури та виділення другої фази. Розмір зерна перших етапах деформації зменшується до $6\div 20$ мкм. На останніх етапах деформації для ПЗ характерна поява дрібних ($0.3\div 0.5$ мкм) рівноосних фрагментів, тоді як для СТ-технології характерний розмір зерен становить $1\div 4$ мкм. Аналіз даних табл. 1 показує, що в стандартних зразках середній розмір зерен у поздовжньому перерізі більше, ніж у поперечному приблизно на 35 %, коефіцієнт витягнутості поводить аналогічно (різниця між подовжнім і поперечним перерізами приблизно 40 %).

У зразках, прокатаних за технологією ПЗ, спостерігається зворотна тенденція: у поздовжньому перерізі середній розмір зерен менший, ніж у поперечному, в середньому на 30 %, коефіцієнт витягнутості – на 25 %. Розміри зерен після ПЗ менші, ніж після СТ, на 16 % у поперечному перерізі та на 62 % – у поздовжньому.

Коефіцієнт витягнутості після ПЗ приблизно дорівнює (у межах помилки) коефіцієнта витягнутості при СТ у поперечному перерізі та менше на 53 % у поздовжньому перерізі. Матеріал після СТ має більші зерна, ніж після ПЗ;

структура в результаті стандартної прокатки має більшу анізотропію (у поздовжньому перерізі і розміри зерен, і коефіцієнт витягнутості значно більше, ніж у поперечному). Після обробки ПЗ структура більш однорідна (відмінності витягнутості зерен в обох перерізах менші порівняно зі стандартною прокаткою СТ) і характеризується меншими значеннями розміру зерен. Виконаний кількісний металографічний аналіз показав, що деформація СТ призводить до появи анізотропії, а ПЗ формує більш рівномірну структуру. Це спостереження свідчить про можливе протікання рекристалізації в процесі деформації. Водночас ефекти від розвитку рекристалізації in-situ повинні проявитися при дослідженнях тонкої структури матеріалу методом рентгеноструктурного аналізу (РСА).

Методом РСА оцінено розміри блоків, щільність дислокацій, рівень мікронапруг для зразків з найбільшими ступенями деформації після 4 проходів. Матеріал після СТ- і ПЗ-обробки мав ступінь деформації ϵ , рівну 2.65 і 2.41 відповідно.

Ураховуючи, що в менших кутах сильніше дається взнаки блочність, а у великих – напруги другого роду, аналіз блочності проводили по лініях (111) і (222), а внесок мікронапруг – по лініях (200) і (400) (табл. 2).

Порівняння величини мікронапруг дає змогу зробити такі висновки: для відповідних обробок мікронапруги в поперечному перерізі менше, ніж у поздовжньому, приблизно на 30 % для СТ і на 50 % – для ПЗ; після обробки СТ величина мікронапруг більше, ніж після прокатки зі зсувом на 30 % у поперечному перерізі та на 4 % – у поздовжньому.

Порівняння величин блоків дає змогу зафіксувати, що: для СТ розміри блоків у поперечному перерізі менші, ніж у поздовжньому, на 33 %; для ПЗ, навпаки, розміри блоків у поздовжньому перерізі менші, ніж у поперечному на

Таблиця 1

Результати кількісної металографії деформованих зразків та статистичної обробки результатів

Обробка	Середній розмір зерен, мкм			K_{ϕ}	Статистичні характеристики			
	$d_{\text{прод}}$	$d_{\text{попер}}$	$(d_{\text{попер}} + d_{\text{прод}})/2$		довір. інт.	ексцес	Асиметрія	дисперсія
Вихідний стан	21.03	7.17	14.09	0.33	± 0.37	2.94	1.41	1.44
СТ, $\epsilon = 2.65$, продовжний переріз	7.09	1.62	4.35	0.23	± 0.75	2.20	1.3	5.88
СТ, $\epsilon = 2.65$, поперечний переріз	4.08	1.55	2.82	0.38	± 0.31	1.42	0.80	1.02
ПЗ, $\epsilon = 2.41$, продовжний переріз	2.22	1.07	1.64	0.48	± 0.2	0.70	0.56	0.42
ПЗ, $\epsilon = 2.41$, поперечний переріз	3.46	1.25	2.36	0.36	± 0.29	1.14	1.09	0.89

Таблиця 2

Результати розрахунку величини мікронапруг і розмірів блоків

Вид та ступінь деформації, орієнтація перерізу	Фізичне розширення β				Відносне розширення		Мікронапруги, $\Delta d / d \cdot 10^{-5}$		Розмір блоків D, мкм	
	(111)	(200)	(222)	(400)	β_{222}/β_{111}	β_{400}/β_{200}	(111) и (222)	(200) и (400)	(111) и (222)	(200) и (400)
СТ, $e = 2.65$, поперечний переріз	2.25	2.79	4.68	14.64	2.081	5.25	1.588	3.126	0.41	1.29
СТ, $e = 2.65$, подовжній переріз	3.44	3.53	9.03	20.34	2.63	5.77	4.119	4.456	0.61	3.4
ПЗ, $e = 2.41$, поперечний переріз	1.6	2.0	4.68	10.39	2.93	5.19	2.232	2.181	1.61	2.63
ПЗ, $e = 2.41$, подовжній переріз	3.72	3.24	8.51	19.31	2.29	5.97	3.665	4.278	0.41	14.7

75 %. У подовжньому перерізі розміри блоків після стандартної обробки більше, ніж після прокатки зі зсувом, на 33 %; у поперечному перерізі розміри блоків після ПЗ більші, ніж після СТ, на 75 %.

Так, що більше вплив параметра $\Delta d/d$ на розширення, то більш рівномірно розподілені дислокації. Це говорить про те, що в разі проведення прокатки зі зсувом дислокації розподілені в об'ємі зерен більш рівномірно, ніж при прокатці за стандартною технологією. Зважаючи на це, оцінили загальну щільність дислокацій у зразках після двох типів деформації (табл. 3).

Таблиця 3

Результати визначення щільності дислокацій

Характеристика зразка		Щільність дислокацій $\times 10^8, \text{см}^{-2}$
вид деформації	переріз	лінії (111)
СТ $e = 2.65$	поперечний	17.01
	подовжній	12.49
ПЗ $e = 2.41$	поперечний	3.62
	подовжній	27.55

З таблиці видно, що після СТ-прокатки щільність дислокацій у поперечному перерізі більша, ніж у подовжньому; після ПЗ щільність дислокацій вище в подовжньому перерізі порівняно з поперечним. Привертає увагу те що, що середня щільність дислокацій для СТ і ПЗ майже однакова лінії (111): 14.8×10^8 і $15.6 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ відповідно.

Однак при СТ дислокації розподілені рівномірніше по різних перерізах. Значна різниця щільності дислокацій у різних перерізах після ПЗ з урахуванням падіння рівня мікротвердості,

меншого розміру зерен при ПЗ, розмір блоків може бути пояснено в межах теорії спрямованої рекристалізації. Слід зазначити, що рівна щільність дислокацій для обох схем деформації відповідає меншому розміру зерен при ПЗ. Вимірювання щільності дислокацій шляхом рентгеноструктурного аналізу відбувається інтегрально, тобто оцінюється загальна щільність дефектів у матеріалі. Це означає, що в полі зерна при ПЗ щільність дислокацій менша, ніж при СТ, що також опосередковано підтверджує теорію перебігу спрямованої рекристалізації

Висновки. Комплексний аналіз змін структури, мікротвердості та даних рентгеноструктурного аналізу дає змогу зробити такі висновки:

1. При порівнянні двох видів прокатки встановлено, що в поперечному перерізі формуються відносно однакові за розміром та коефіцієнтом витягнутості зерна для СТ- та ПЗ-обробки; формування дрібніших блоків після стандартної прокатки, порівняно з прокаткою зі зсувом, зумовлює більш високий рівень мікронапруг і, відповідно, мікротвердості; у подовжньому перерізі всі показники (розмір зерна, коефіцієнт витягнутості, розмір блоків) вищі для стандартної обробки; більш значуща різниця в значеннях мікротвердості в цьому перерізі після двох видів прокатки зумовлюється значною деформованістю та великим рівнем мікронапруг зразків після СТ.

2. Після прокатки за технологією СТ розмір зерна в поперечному перерізі менше, ніж у подовжньому; аналогічно веде себе коефіцієнт витягнутості, розміри блоків та мікронапруги. Тобто в результаті прокатки формується досить велике, витягнуте вздовж осі деформації зерно. Значна дисперсність структури в поперечному

перерізі зумовлює більший рівень мікронапруги. Утворення блоків також відбувається вздовж осі деформації, унаслідок чого мікронапруги в поздовжньому перерізі вище, ніж у поперечному. Загалом, у формування структури при СТ помітний внесок вносять мікронапруги, пов'язані із сильною анізотропією зерен та субзерен, що й відбивається на результатах мікротвердості.

3. Після прокатки зі зсувом спостерігається нетипова поведінка матеріалу: розмір зерен, їх коефіцієнт витягнутості та величина блочності в поперечному перерізі більше, ніж у поздовжньому. Велика деформованість зерен у поперечному перерізі після ПЗ, порівняно

зі стандартною прокаткою, зумовлює високу мікротвердість. Показано, що в результаті обробки ПЗ в поздовжньому перерізі формуються блоки, які можна порівняти з величиною зерна в поперечному перерізі. Усе сказане підтверджує гіпотезу про руйнування текстури при ПЗ на останніх стадіях деформації.

Формування після ПЗ більш дрібної, але також витягнутої структури та одночасне зменшення далекосяжних полів напруг і пружних спотворень кристалічних ґрат (порівняно зі стандартною прокаткою) свідчать про розвиток процесу спрямованої рекристалізації під час деформації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Алієва Л. І., Жбанков Я. Г., Маркова М. А., Таган Л. В. Комбінована пластична деформація зі зсувом для отримання великих заготовок. *Обробка матеріалів тиском: сб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА*. 2013. № 3 (36). С. 3–9.
2. Zavdoveev A., Baudin T., Pashinska E., Kim H., Brisset F., Heaton M., Poznyakov V., Rogante M., Tkachenko V., Klochkov I., Skoryk M. Continuous Severe Plastic Deformation of Low-Carbon Steel: Physical-Mechanical Properties and Multi-Scale Structure Analysis. *Steel research international*. 2021. Vol. 92. Issue 3. 2000482.
3. Mahesh Panchal, Lalit Kaushik, Ravi Kottan Renganayagalu, Shi-Hoon Choi, Jaiveer Singh. Exploring microstructure and texture evolution in AZX311 Mg alloy under cyclic shear deformation. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2025. Vol. 13 (3). P. 1258–1274. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2025.02.009>
4. Valery I. Levitas. Strain-induced phase transformations, chemical reactions, microstructure evolution, and severe plastic deformations under high pressure. *Progress in Materials Science*. 2026. Vol. 158. 101625 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101625>
5. Ghader Faraji, Hyoung Seop Kim, Hessam Torabzadeh Kashi. Severe Plastic Deformation. Methods, Processing and Properties. 2018 Elsevier Inc., 315 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05256-7>
6. Хоменко О.В. Інтенсивна пластична деформація: методи та математичні моделі формування наноматеріалів. *Журнал фізичних досліджень*. 2020. Т. 24, № 2. 2001 (20 с.).
7. Alireza Rezaei, Reza Mahmudi, Roland E. Logé. Dynamic recrystallization and strengthening mechanisms in a magnesium alloy processed by severe plastic deformation. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2025. Vol. 13, Issue 11. P. 5600–5623. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2025.09.031>
8. Hee-Tae Jeong, Sang Yun Han, Chae Woo Ryu, Woo Jin Kim. Balancing strength and ductility in MP159 superalloy (Co–Ni–Cr–Fe–Mo–Ti–Al–Nb) through severe plastic deformation and multistage heat treatment. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. Vol. 1047. 184852. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.184852>
9. Zarini D., Fereshteh-Saniee F. Significant improvement in the fracture toughness of 3105 Al sheets under cyclic loading by microstructural evolution through severe-plastic deformation. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 39. P. 5064–5077. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.10.188>
10. Varyukhin V. M., Pashinska O. G., Tkachenko V. M., Burkhovetskii V. V. Structural Modification of AD-1 Aluminium Alloy by the Method of Cold Rolling with Shift. *Металофізика та новітні технології*. 2015. Issue 37, № 4. P. 571–579.

REFERENCES:

1. Aliieva, L. I., Zhabankov, Ya. H., Markova, M. A., & Tahan, L. V. (2013). Kombinovana plastychna deformatsiia zi zsuvom dlia otrymannia velykykh zahotovok [Combined plastic deformation with shear for obtaining large billets]. *Obrobka materialiv tyskom*, 3(36), 3–9 [in Ukrainian].
2. Zavdoveev, A., Baudin, T., Pashinska, E., Kim, H., Brisset, F., Heaton, M., Poznyakov, V., Rogante, M., Tkachenko, V., Klochkov, I., & Skoryk, M. (2021). Continuous severe plastic deformation of low-carbon steel: Physical-mechanical properties and multi-scale structure analysis. *Steel Research International*, 92(3), Article 2000482. <https://doi.org/10.1002/srin.202000482>

3. Panchal, M., Kaushik, L., Renganayagalu, R. K., Choi, S.-H., & Singh, J. (2025). Exploring microstructure and texture evolution in AZX311 Mg alloy under cyclic shear deformation. *Journal of Magnesium and Alloys*, 13, 1258–1274. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2025.02.009>
4. Levitas, V. I. (2026). Strain-induced phase transformations, chemical reactions, microstructure evolution, and severe plastic deformations under high pressure. *Progress in Materials Science*, 158, Article 101625. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101625>
5. Faraji, G., Kim, H. S., & Torabzadeh Kashi, H. (2018). *Severe plastic deformation: Methods, processing and properties*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-05256-7>
6. Khomenko, O. V. (2020). Intensyvna plastychna deformatsiia: metody ta matematychni modeli formuvannia nanomaterialiv [Severe plastic deformation: Methods and mathematical models of nanomaterial formation]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen*, 24(2), Article 2001 [in Ukrainian].
7. Rezaei, A., Mahmudi, R., & Logé, R. E. (2025). Dynamic recrystallization and strengthening mechanisms in a magnesium alloy processed by severe plastic deformation. *Journal of Magnesium and Alloys*, 13(11), 5600–5623. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2025.09.031>
8. Jeong, H.-T., Han, S. Y., Ryu, C. W., & Kim, W. J. (2025). Balancing strength and ductility in MP159 superalloy (Co–Ni–Cr–Fe–Mo–Ti–Al–Nb) through severe plastic deformation and multistage heat treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 1047, Article 184852. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.184852>
9. Zarini, D., & Fereshteh-Saniee, F. (2025). Significant improvement in the fracture toughness of 3105 Al sheets under cyclic loading by microstructural evolution through severe plastic deformation. *Journal of Materials Research and Technology*, 39, 5064–5077. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.10.188>
10. Varyukhin, V. M., Pashinska, O. G., Tkachenko, V. M., & Burkhovetskii, V. V. (2015). Structural modification of AD-1 aluminium alloy by the method of cold rolling with shift. *Metallofizika ta novitni tekhnolohii*, 37(4), 571–579.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 08.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 621.89:678.07

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-11>

ВПЛИВ ШВИДКОЗАГАРТОВАНИХ СПЛАВІВ AL-CO ТА AL-NI НА ПОКАЗНИК АБРАЗИВНОГО СТИРАННЯ ПОЛІЕФІРЕФІРКЕТОНУ

Томіна Анна-Марія Вадимівна,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри фізики конденсованого стану

Дніпровського державного технічного університету

ORCID ID: 0000-0001-5354-0674

У роботі досліджено вплив дисперсних швидкозагартованих бінарних сплавів систем Al-Co та Al-Ni. Вміст Co і Ni в Al становив 10 мас. % при оцінюванні показника абразивного стирання поліефірефіркетону марки Victrex150 G. Установлено, що введення даних сплавів у кількості 5–25 мас. % призводить до зменшення цього показника у 1,8 раза, що свідчить про ефективне зміцнення полімерного композиту. Підвищення зносостійкості поліефірефіркетону пояснюється зменшенням пружно-пластичних деформацій у приповерхневих шарах, що сприяє вповільненню процесів зародження та розвитку мікротріщин, а також локальних зон руйнування, підтвердженням чого є зменшення шорсткості поверхні у 1,7 раза. Виявлено, що ефективний вміст дисперсних бінарних сплавів у складі композиту становить 20 мас. %, за якого досягаються мінімальні значення показника абразивного стирання та шорсткості поверхні. Подальше збільшення вмісту дисперсного наповнювача до 25 мас. % призводить до зниження ефективності зміцнення внаслідок агрегації часток сплавів і формування структурних дефектів у полімерній матриці. Підтвердженням цього є зменшення мікротвердості в зоні межі поділу «полімер – наповнювач». Отримані результати свідчать про перспективність використання швидкозагартованих бінарних сплавів систем Al-Co та Al-Ni для створення нових полімерних композитів із високою зносостійкістю до дії абразивних часток. Розроблені композити можуть бути використані для виготовлення зносостійких компонентів сільськогосподарської, металургійної та автомобільної техніки, експлуатація яких відбувається в агресивних умовах, зокрема під впливом високих температур, підвищеної вологості, кислот, лугів та абразивних часток.

Ключові слова: поліефірефіркетон, бінарні сплави, показник абразивного стирання.

Tomina Anna-Mariia. Influence of rapidly quenched Al-Co and Al-Ni alloys on the abrasive wear rate of polyetheretherketone

The paper investigates the effect of dispersed rapidly quenched binary alloys of the Al-Co and Al-Ni systems. The Co and Ni content in Al was 10 wt.% when evaluating the abrasive wear rate of polyetheretherketone grade Victrex 150G. It was established that the introduction of these alloys in the amount of 5–25 wt.% leads to a 1.8-fold reduction in the wear rate, indicating effective strengthening of the polymer composite. The increase in the wear resistance of polyetheretherketone is explained by a decrease in elastic-plastic deformations in the near-surface layers, which contributes to the retardation of the initiation and propagation of microcracks as well as local fracture zones. This is confirmed by a 1.7-fold decrease in surface roughness. It was found that the optimal content of dispersed binary alloys in the composite is 20 wt.%, at which the minimum values of abrasive wear rate and surface roughness are achieved. A further increase in the filler content up to 25 wt.% leads to a decrease in the strengthening efficiency due to agglomeration of alloy particles and the formation of structural defects in the polymer matrix. This is confirmed by a decrease in microhardness in the “polymer – filler” interfacial zone. The obtained results demonstrate the prospects of using rapidly quenched binary alloys of the Al-Co and Al-Ni systems for the development of new polymer composites with high resistance to abrasive wear. The developed composites can be used for the manufacture of wear-resistant components for agricultural, metallurgical, and automotive equipment operated under aggressive conditions, including the influence of high temperatures, increased humidity, acids, alkalis, and abrasive particles.

Key words: polyetheretherketone, binary alloys, abrasive wear rate.

Вступ. Сьогодні одним із найпоширеніших видів спрацювання вузлів тертя сільськогосподарської, автомобільної та гірничодобувної техніки є абразивне зношування серійних металевих деталей [1, с. 75], що, своєю чергою, призводить до скорочення терміну ефективної роботи, зростання часу простою обладнання та, як наслідок, збільшення економічних збитків. Ефективним способом розв'язання цієї проблеми є застосування полімерних композиційних

матеріалів (далі – ПКМ), до складу яких входять дисперсні наповнювачі (Нп) різної природи. Як показав аналіз літературних джерел [2–6, с. 20, 42, 72, 388, 559], використання порошків чистих металів (алюмінію, титану, заліза, міді), аморфних сплавів, графіту, каоліну, гідроксид алюмінію, карбонат кальцію, бокситу, діоксиду кремнію, нітриду алюмінію чи бору, оксиду заліза та алюмінію, карбід кремнію чи бору дає змогу отримати матеріали з високими показниками

зносостійкості в різних умовах експлуатації. Особливий інтерес як Нп викликають швидкозагартовані сплави, отримані з рідкого стану. Це зумовлено тим, що високий рівень мікронапружень у кристалічній решітці основному металу ($\Delta a/a \geq 2,5 \cdot 10^{-3}$) забезпечує таким сплавам підвищену стійкість до корозії та зношування, а також високу твердість і міцність. Завдяки високій швидкості охолодження (до $10^5 - 10^6$ K/c) у процесі твердіння формується дрібнодисперсна структура з метастабільними фазами, що сприяє покращенню функціональних властивостей матеріалу. Вказані структурні особливості та комплекс підвищених експлуатаційних властивостей швидкозагартованих сплавів обґрунтовують доцільність пошуку нових складів ПКМ із використанням цих сплавів як дисперсних Нп. З цією метою поставлені такі завдання: розробити ПКМ на основі поліефірефіркетону, наповненого дисперсним (100–160 мкм) сплавом систем Al-Co та Al-Ni у кількості 5–25 мас. %; визначити вплив відсоткового вмісту зазначених Нп на показник абразивного стирання поліефірефіркетону; оцінити перспективність застосування цих Нп для створення ПКМ, призначених для роботи в умовах абразивного зношування.

Методи та методики дослідження. Поліефірефіркетон (далі – ПЕЕК) марки Victrex150 G (фірма виробник – британська компанія ICI) обрано як матрицю для створення нових складів ПКМ. ПЕЕК є напівкристалічним полімером, що містить в основному ланцюзі повторювані мономерні ланки двох ефірних груп й однієї кетонної групи. ПЕЕК належить до суперконструкційних полімерів, оскільки вирізняється унікальною комбінацією властивостей, серед яких – виняткова хімічна інертність, електрична та температурна стійкість, висока зносостійкість, міцність на розтяг і стабільність розмірів, що зберігаються в широкому температурному інтервалі [7, с. 28].

Як дисперсні (100–160 мкм) наповнювачі для ПЕЕК обрано два бінарні сплави систем Al-Co та Al-Ni із відсотковим вмістом Co і Ni в Al 10 мас. %, компоненти яких характеризуються високими антикорозійними, термічними та трибологічними властивостями. Діаграми стану систем Al-Co та Al-Ni зі сторони алюмінію характеризується майже нульовою розчинністю Co чи Ni у ґратці алюмінію: у рівноважному стані вона не перевищує 0,02 мас. % [8–9, с. 776, 1092]. Відомо, що метод гартування з рідкого стану (далі – ГРС), який супроводжується великими швидкостями охолодження $10^6 - 10^8$ K/c, дає змогу істотно загальмувати

рівноважні процеси кристалізації та забезпечити формування нерівноважних структур. За таких умов можливе отримання однофазних сильно пересичених твердих розчинів (далі – СПТР) на основі ГЦК – ґратки алюмінію. Оскільки атомні радіуси Al ($r_{Al} = 0,40494$ нм), Co ($r_{Co} = 0,1260$ нм) та Ni ($r_{Ni} = 0,1240$ нм) суттєво відрізняються, формування СПТР заміщення супроводжується зміною періоду ґратки та значними пружними викривленнями кристалічної решітки алюмінію [3; 4, с. 388, 558].

Виготовлення зразків ПЕЕК та ПКМ на його основі з умістом бінарних сплавів 5–25 мас. % здійснювали методом сухого змішування в апараті з обертальним електромагнітним полем індукцією 0,12 Тл за допомогою феромагнітних часток, які після змішування вилучали з отриманої суміші методом магнітної сепарації. Суміш завантажували в прес-форму, температура якої становила 523 К, здійснювали її нагрів до $t_1 = 598$ К та витримували за цієї температури 10 хв без навантаження та 10 хв під постійним навантаженням 15 МПа. Далі зразки охолоджували під постійним навантаженням до температури 523 К та вилучали з прес-форми [7, с. 28].

Стійкість розроблених ПКМ і чистого ПЕЕК до дії жорстко закріплених часток абразиву з дисперсністю 100 мкм досліджували з використанням машини HECKERT. Дослідження морфології поверхонь тертя та їх мікрогеометрії (R_a , мкм) здійснювали за допомогою мікроскопа БІОЛАМ-М та щупового профілометра 170621. За допомогою мікротвердоміра ПМТ–3М визначали мікротвердість та характер взаємодії бінарних сплавів із ПЕЕК на межі поділу «полімер – наповнювач» [4, с. 558].

Основною інженерною характеристикою, що відображає стійкість матеріалу до абразивного зношування, є показник абразивного стирання V_i , мм³/м, який розраховували за формулою:

$$V_i = \frac{\Delta m \cdot 1000}{\rho_{\text{екс}} \cdot L},$$

де Δm – вагове зношування зразка, г;

$\rho_{\text{екс}}$ – експериментальна густина зразка, г/см³;

L – шлях, який проходить зразок за один цикл випробування, м.

Результати. Із даних, наведених на рис. 1, видно, що введення обох бінарних сплавів призводить до зменшення показника абразивного стирання поліефірефіркетону марки Victrex150 G у 1,8 раза.

Зростання стійкості ПЕЕК до впливу жорстко закріплених часток абразиву можна пояснити тим, що введення твердого (HV = 800 МПа) дисперсного Нп сприяє зміцненню поверхневого

шару ПКМ і, як наслідок, зменшенню пружнопластичної деформації в приповерхневих шарах [10, с. 97] навела посилання, яке це пояснює. Це, своєю чергою, уповільнює розвиток мікротріщин та локальних зон руйнування [11, с. 210]. Підтвердженням такого висновку є зменшення шорсткості поверхні (див. рис. 2) у 1,7 раза [12, с. 2762].

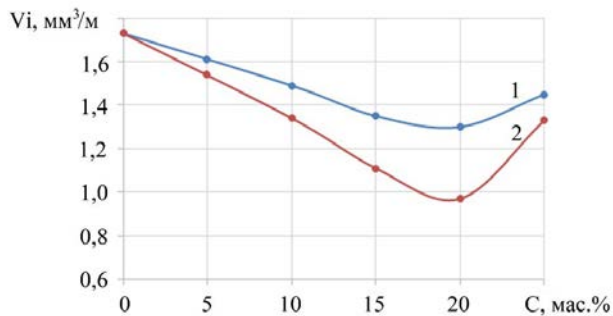


Рис. 1. Вплив вмісту (C, мас.%) бінарного сплаву Al-Co (1) та Al-Ni (2) на показник абразивного стирання (V_i , мм³/м) поліефірефіркетону

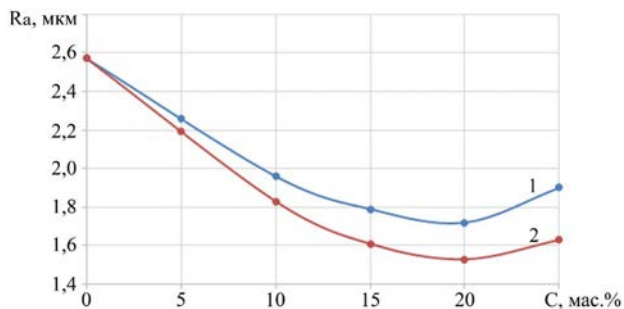


Рис. 2. Вплив вмісту (C, мас.%) бінарного сплаву Al-Co (1) та Al-Ni (2) на шорсткість поверхні (R_a , мкм) поліефірефіркетону

Додатковим підтвердженням підвищення опору абразивному зношуванню є результати порівняльного аналізу поверхонь тертя чистого ПЕЕК та композитних матеріалів (рис. 3). На поверхні тертя ПЕЕК спостерігаються глибокі борозни проорювання, що свідчить про легке проникнення твердих часток абразиву в матеріал і розвиток інтенсивного мікрорізання. Це вказує на низьку здатність полімеру чинити опір абразивному впливу. Водночас поверхні тертя ПКМ з умістом 20 мас. % сплавів Al-Co або Al-Ni характеризуються значно меншим ступенем пошкодження: глибина та щільність борозен істотно знижуються. Отримані результати свідчать про ефективну дію зміцнювальної фази, яка сприймає частину прикладеного навантаження та перешкоджає проникненню дисперсних (100 мкм) твердих часток абразиву [13, с. 30].

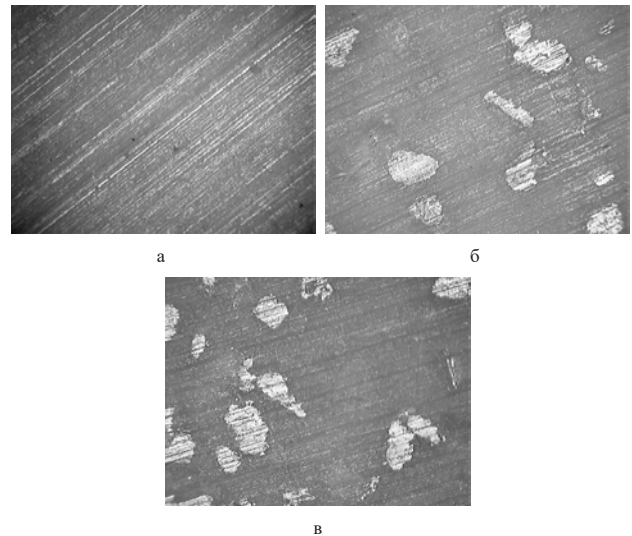


Рис. 3. Поверхні тертя: поліефірефіркетону (а); композиту на його основі, що містить 20 мас. % сплаву Al-Co (б) і Al-Ni (в)

Слід зазначити, що найменші значення показника абразивного стирання досягаються за вмісту 20 мас. % сплавів Al-Co або Al-Ni. Подальше підвищення їх концентрації до 25 мас. % у складі ПЕЕК призводить до зниження зносостійкості ПКМ під час контакту з жорстко закріпленими абразивними частками. Імовірно причиною такого ефекту є зростання кількості структурних дефектів у полімерній матриці, що негативно впливає на її здатність ефективно сприймати механічні навантаження. Формування зазначених дефектів, імовірно, зумовлене агломерацією дисперсних часток бінарних сплавів під дією вандерваальсових сил, унаслідок чого утворюються скупчення з внутрішніми порожнинами [14, с. 45]. Такі агломерати характеризуються зменшеною площею контакту наповнювача з полімерною фазою, що знижує ефективність міжфазної взаємодії. Зазначене узгоджується з результатами вимірювання мікротвердості на межі поділу «полімер – наповнювач» (рис. 4) [15, с. 785].

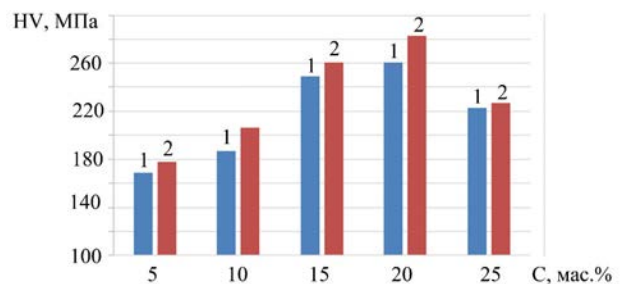


Рис. 4. Залежність мікротвердості (HV, МПа) на межі поділу «полімер – наповнювач» поліефірефіркетону від умісту (C, мас. %) бінарного сплаву Al-Co (1) та Al-Ni (2)

Зазначимо, що найбільше на покращення показника абразивного стирання ПEEK впливає введення бінарного сплаву системи Al-Ni. Це зумовлено кращою адгезією (рис. 4) на межі поділу «полімер – наповнювач», і, як наслідок, виникнення формування сильних міжфазних молекулярних зв'язків, які забезпечують високі трибологічні властивості [15, с. 785].

Висновки. Аналіз результатів отриманих досліджень показав:

1. Установлено, що введення бінарних сплавів систем Al-Co та Al-Ni до складу поліефірефіркетону забезпечує зниження показника абразивного стирання у 1,8 раза, що підтверджує ефективність зміцнення композиту матеріалу.

2. Зростання зносостійкості ПEEK зумовлено зменшенням пружно-пластичних деформацій

у приповерхневих шарах, що сприяє гальмуванню процесів зародження мікротріщин і формування локальних зон руйнування.

3. Ефективний уміст Нп у складі ПКМ становить 20 мас. %, за якого досягаються мінімальні значення показника абразивного стирання та шорсткості поверхні (приблизно у 1,7 раза).

4. Подальше підвищення вмісту сплавів до 25 мас. % призводить до зниження ефективності зміцнення внаслідок агломерації часток і формування структурних дефектів у полімерній матриці.

5. Результати мікроструктурного аналізу поверхонь тертя підтвердили зменшення глибини та щільності борозен у композитах з бінарними сплавами, що свідчить про підвищення здатності матеріалу протидіяти абразивному зношуванню.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Борак К., Рябчук О., Рябчук П. Механізм абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті: збірник тез доповіді Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Рівне, 9–10 квітня 2025 р.). Рівне: НУВГП, 2025. С. 75–81. URL: <http://repozitory.zhatk.zt.ua/handle/123456789/876>
2. Yeriomina Ye. A., Lysenko O. B., Nosenko V. K., Yarovy Ya. E. Study of the influence of quick-hardened alloy on the properties of metal polymers. *Journal of Physics and Electronics*. 2021. № 1 (29). P. 41–44. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/jphel_2021_29%281%29__7
3. Bashev V. F., Tomin S. V., Kalinina T. V., Kushnerov O. I., Bondar N. P. Effect of binary Al-Ni alloy on the rate of abrasive wear of ultra-high molecular weight polyethylene. *Functional Materials*. 2024. № 4(31). P. 557–560. <http://dx.doi.org/10.15407/fm31.02.557>
4. Bashev V. F., Tomina A.-M. V., Mykyta K. A., Kalinina T. V., Riabtsev S. I., Kushnerov O. I. The influence of a rapidly-quenched filler on the wear resistance of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Functional Materials*. 2024. № 3(31). P. 387–390. <http://dx.doi.org/10.15407/fm31.03.387>
5. Застосування полімерних композитів в АПК / Кобець А. С. та ін. Дніпро : Журфонд, 2022. 356 с. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7031>
6. Кабат О. С., Пікула І. І. Композити на основі фторполімерів і метод їх перероблення у виробі. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2025. № 2. P. 67–74. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-67-74>
7. Buria O. I., Tomina A.-M. V., Nachovnyi I. I. Influence of carbon fiber on tribotechnical characteristics of polyetheretherketone. *Problems of Tribology*. 2020. № 4/98 (25). P. 27–32. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-98-4-27-32>
8. Čelko L., Klakurková L., Švejcar J. Diffusion in Al-Ni and Al-NiCr interfaces at moderate temperatures. *Defect and Diffusion Forum Vols*. 2010. Vol. 297–301. P. 771–777. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.771>
9. Sfikas A. K., Gonzalez S., Lekatou A.G., Kamnis S., Karantzalis A. E. A critical review on Al-Co alloys: fabrication routes, microstructural evolution and properties. *Microstructural tailoring of metals and alloys*. 2022. № 12(7). P. 1092. <https://doi.org/10.3390/met12071092>
10. Lapčík L., Mañas D., Lapčíková B., Vašina M., Staněk M., Čépe K., Vlček J., Waters K.E., Greenwood R.W., Rowson N.A. Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behavior of high density poly(ethylene)/mica and poly(ethylene)/wollastonite composites. *Chemical Engineering*. 2017. Vol. 141. P. 92–99.
11. Zsidai L., Kátai L. Abrasive wear and abrasion testing of PA 6 and PEEK composites in small-scale model system. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2016. № 6. P. 197–214. URL: https://acta.uni-obuda.hu/Zsidai_Katai_70.pdf
12. Tijum R., Vellinga W.P., De Hosson J.Th.M. Surface roughening of metal-polymer systems during plastic deformation. *Acta Materialia*. 2007. № 8(55). P. 2757–2764. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.12.013>
13. Денисенко М. І., Рубльов В. І. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з використанням точкового зміцнення. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. 2011. № 2(24). С. 28–35. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2011_24%282%29__8

14. Zare Y., Rhee K. Y., Hui D. Influences of nanoparticles aggregation/agglomeration on the interfacial/interphase and tensile properties of nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 122. P. 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.04.008>
15. Yeriomina Ye. A., Burya A. I. Investigating the influence of overmolecular structure on the properties of metal-containing polymers. *Functional Materials*. 2020. № 4(27). P. 781–785. <https://doi.org/10.15407/fm27.04.781>

REFERENCES:

1. Borak, K., Riabchuk, O., & Riabchuk, P. (2025). *Mekhanizm abrazyvnoho znoshuvannia robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn* [Mechanism of abrasive wear of working bodies of tillage machines]. In *Innovations in the agro-industrial complex, mechanical engineering and transport (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rivne, Ukraine, April 9–10, 2025, 75–81* [in Ukrainian].
2. Yeriomina, Ye. A., Lysenko, O. B., Nosenko, V. K., & Yarovyi, Ya. E. (2021). Study of the influence of quick-hardened alloy on the properties of metal polymers. *Journal of Physics and Electronics*, 1(29), 41–44. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/jphel_2021_29%281%29__7
3. Bashev, V. F., Tomin, S. V., Kalinina, T. V., Kushnerov, O. I., & Bondar, N. P. (2024). Effect of binary Al-Ni alloy on the rate of abrasive wear of ultra-high molecular weight polyethylene. *Functional Materials*, 4(31), 557–560. <http://dx.doi.org/10.15407/fm31.02.557>
4. Bashev, V. F., Tomina, A.-M. V., Mykyta, K. A., Kalinina, T. V., Riabtsev, S. I., & Kushnerov, O. I. (2024). The influence of a rapidly-quenched filler on the wear resistance of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Functional Materials*, 3(31), 387–390. <http://dx.doi.org/10.15407/fm31.03.387>
5. Kobets, A. S., et al. (2022). *Zastosuvannia polimernykh kompozytiv v APK* [Application of polymer composites in the agro-industrial complex]. Dnipro, Ukraine: Zhurfond. Retrieved from <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7031> [in Ukrainian].
6. Kabat, O. S., & Pikula, I. I. (2025). *Kompozyty na osnovi ftorpolimeriv i metod yikh pereroblennia u vyroby* [Composites based on fluoropolymers and methods of their processing into products]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (2), 67–74. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2025-159-2-67-74>. [in Ukrainian].
7. Buria, O. I., Tomina, A.-M. V., & Nachovnyi, I. I. (2020). Influence of carbon fiber on tribotechnical characteristics of polyetheretherketone. *Problems of Tribology*, 4/98 (25), 27–32. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-98-4-27-32>
8. Čelko, L., Klakurková, L., & Švejcar, J. (2010). Diffusion in Al-Ni and Al-NiCr interfaces at moderate temperatures. *Defect and Diffusion Forum Vols*, 297–301, 771–777. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.771>
9. Sfikas, A. K., Gonzalez, S., Lekatou, A. G., Kamnis, S. & Karantzalis, A. E. (2022). A critical review on Al-Co alloys: fabrication routes, microstructural evolution and properties. *Microstructural tailoring of metals and alloys*, 12(7), 1092. <https://doi.org/10.3390/met12071092>
10. Lapčík, L., Maňas, D., Lapčíková, B., Vašina, M., Staněk, M., Čépe, K., Vlček, J., Waters, K. E., Greenwood, R. W., & Rowson, N. A. (2017). Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behavior of high density poly(ethylene)/mica and poly(ethylene)/wollastonite composites. *Chemical Engineering*, 141, 92–99.
11. Zsidai, L., & Kátai, L. (2016). Abrasive wear and abrasion testing of PA 6 and PEEK composites in small-scale model system. *Acta Polytechnica Hungarica*, 6, 197–214. Retrieved from https://acta.uni-obuda.hu/Zsidai_Katai_70.pdf
12. Tijum, R., Vellinga, W. P., & De Hosson, J. Th. M. (2007). Surface roughening of metal-polymer systems during plastic deformation. *Acta Materialia*. 8(55), 2757–2764. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.12.013>
13. Denysenko, M. I., & Rubliov, V. I. (2011). *Pidvyshchennia dovhovichnosti robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn z vykorystanniam tochkovoho zmitsnennia* [Increasing the durability of tillage machine working bodies using spot strengthening]. *Proceedings of the Kirovohrad National Technical University*, 2(24), 28–35. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2011_24%282%29__8 [in Ukrainian].
14. Zare, Y., Rhee, K. Y., Hui D. (2017). Influences of nanoparticles aggregation/agglomeration on the interfacial/interphase and tensile properties of nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 122, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.04.008>
15. Yeriomina, Ye. A., Burya, A. I. (2020). Investigating the influence of overmolecular structure on the properties of metal-containing polymers. *Functional Materials*, 4(27), 781–785. <https://doi.org/10.15407/fm27.04.781>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 03.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

UDC 621.791.75

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-12>

STABILITY OF ARC PROCESS AND METAL TRANSFER AT MULTI-ELECTRODE MMA CLADDING

Yaros Yuriy Olexandrovich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ORCID ID: 0000-0002-5274-3514

Boiko Ihor Olexandrovich,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

LIMITED LIABILITY COMPANY "TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC"

ORCID ID: 0000-0001-7742-4694

The article is devoted to the study of the features of the electrode metal transfer process during surfacing with one electrode and a beam of electrodes for surfacing T-590. Based on the analysis of current and voltage waveforms and comparison of the corresponding coefficients of variation, the possibility is demonstrated that when using an electrode beam, high stability of the arc process and surfacing performance at the level of mechanized methods can be achieved.

The aim of the study is to compare mass transfer, stability of the arc welding process and its performance using a single coated electrode and a beam of electrodes.

The technique is an experimental study of the process of electric arc surfacing using the original UPE-500 installation, which provides for automatic registration and digital processing of the received data while simultaneously stabilizing the parameters of the surfacing mode.

It has been established that when surfacing with a beam of T 590 electrodes, droplet mass transfer occurs according to type G (without short circuits), in contrast to type D (with short circuits of the arc gap) when welding with a single electrode. The electric arc process is characterized by high stability, which is confirmed by the current change coefficients $K_v^i = 3,2\%$ and voltage $K_v^u = 15,7\%$. It has been shown that the productivity of cladding with a beam of three electrodes increases by 1.6 times compared to surfacing with a single electrode and approaches the productivity of mechanized surfacing methods.

Key words: arc process, multi-electrode cladding, electrode bundle, stability, coefficient of variation, productivity.

Ярос Юрій, Бойко Ігор. Стабільність дугового процесу та перенесення металу за багатоелектродного ММА наплавлення

Статтю присвячено дослідженню особливостей процесу перенесення електродного металу за наплавлення одним електродом і пучком електродів для наплавлення Т-590. На основі аналізу сигналів струму і напруги та порівняння відповідних коефіцієнтів варіації продемонстрована можливість, що в разі використання пучка електродів може бути досягнута висока стабільність дугового процесу і продуктивність наплавлення на рівні механізованих методів. Метою дослідження є порівняння масопереносу, стабільності процесу дугового наплавлення та його продуктивності під час використання одного вкритого електрода та пучка електродів. Методика являє собою експериментальне дослідження процесу електродугового наплавлення з використанням оригінальної установки УПЕ-500, яка забезпечує автоматичну реєстрацію і цифрову обробку отриманих даних з одночасною стабілізацією параметрів режиму наплавлення. Встановлено, що в разі наплавлення пучком електродів Т-590 масоперенос крапель відбувається за типом G (без коротких замикань), на відміну від типу D (з короткими замиканнями дугового проміжку) в разі наплавлення одним електродом. Електродуговий процес характеризується високою стабільністю, що підтверджується коефіцієнтами варіації струму $K_v^i = 3,2\%$ і напруги $K_v^u = 15,7\%$. Показано, що продуктивність наплавлення пучком із трьох електродів збільшується в 1,6 раза порівняно з наплавленням одним електродом і наближається до продуктивності механізованих методів наплавлення.

Ключові слова: дуговий процес, багатоелектродне наплавлення, пучок електродів, стабільність, коефіцієнт варіації, продуктивність.

Introduction. Very hard operating conditions of the working bodies of machines and mechanisms of mining, processing and other industries, especially at the enterprises of mining and processing complexes, lead to premature abrasive wear of parts. Therefore, repair, restoration and strengthening surfacing of damaged parts remains an urgent task of welding production. At the same time, repair work is usually carried out not at specialized enterprises, but in the field using various methods of manual or mechanized welding [1; 2]. The advantage of mechanized surfacing over manually

coated electrodes is the high productivity of the process (with manual surfacing 1.5...1.8 kg/h., with mechanized-2.5...3.0 kg/h.). But mechanized methods require more complex and expensive equipment, qualified personnel and special organization of work. In addition, the cost of welding materials for mechanized welding is significantly higher than the cost of coated electrodes, so, due to the cheapness, manual coated electrodes remain a common method of repair surfacing in accordance with ISO 4063-111.

Research material and method. The relatively low surfacing performance of coated electrodes is explained by the limited strength of the welding current passing through the electrode rod and overheating it. The method of welding with coated electrodes assembled in a bundle makes it possible to reduce the current density to a safe level. In this case, it is possible to sharply increase the permissible welding current strength for the beam. Surfacing with a beam of electrodes located in a line across the seam brings the process closer to mechanized surfacing with an electrode tape and, accordingly, allows you to generally increase the productivity of the technology of surfacing with coated electrodes [3]. At the same time, the specific consumption of electrical energy is reduced in comparison with surfacing with a single coated electrode, which has a diameter equal to the diameter of individual electrodes assembled in a bundle [4].

For the research, we selected T-590 electrodes (manufactured by the Plasmatec companies group), which are widely used for renewable surfacing of parts operating under abrasive wear conditions. T-590 electrodes are often called "sormait", because they correspond to the E-Fe15

group according to EN 14700, create a solid (58-64 HRC) wear-resistant layer and provide the structure of the deposited metal E-H-Fe-PKE (Primary chromium carbides with austenite-carbide eutectic) [5; 6].

The experiments were performed using a unique UPE 500 installation (Fig. 1), which provides the implementation of the bi-Auto principle, that is, it allows automatic recording, processing and recording of the obtained data by the PicoScope 4444 system and PicoScope 7 software, while simultaneously stabilizing the welding process parameters. The use of this technique ensures complete elimination of the influence of the human factor during experimental studies.

Determination of the type of transfer and assess the stability of the arc process, waveforms of current and voltage across the arc were used, and the surfacing performance was calculated based on the results of control weighing of prototypes. The stability of the electric arc process was determined by the value of the coefficient of variation (the percentage ratio of RMS ripple to Mean) of the selected parameter (current, voltage, short-circuit frequency), and the critical value of the coefficient for recognizing the process as stable was accepted. The research program provided for two series of experiments with T-590 electrodes with a diameter of 4 mm: 1) surfacing with one electrode and 2) surfacing with three electrodes assembled in a linear beam. The surfacing rate was chosen to be the same $V_s = 11$ cm/min. Surfacing with one electrode, in order to achieve the greatest productivity of the technology, was performed in forced mode with the following parameters: current $I_c = 190$ A, Arc voltage $U_a = 27$ V. Analysis



Fig. 1. UPE 500 installation (complex)

of the obtained current and voltage waveforms of the electric arc process (Fig. 3) showed the presence of short circuits in the arc gap – regular current peaks with a multiplicity of more than 1.5 and corresponding voltage “dips” below 20 V are observed. Such features are characteristic of mass transfer of Type D [1]. The current change frequency graph automatically constructed by the PicoScope 7 system made it possible to determine the transfer frequency of electrode metal droplets $F_m = 2.795$ Hz with a RMS deviation of 0.472 Hz.

The calculated value of the stability parameter of the arc process (short-circuit frequency) for this type of mass transfer is equal to $K_{V^m}^{F_m} = 16,9\%$, i.e. below the accepted limit $K_{V^m}^{F_m} = 20\%$, and therefore the stability of the electric arc process can be considered quite satisfactory.

The permissible current density during surfacing with one electrode was $j = 15$ A/mm², and the surfacing capacity calculated from changes in the mass of the prototype plate was 1.8 kg/h. Thus, it was found that, despite the sufficient stability of the arc process, the use of a single electrode practically does not increase the surfacing performance, even in forced mode.

For studies of the electric arc process during surfacing with a beam of three electrodes, the mode parameters were selected based on the condition of their implementation on standard industrial power supplies with a rated current of $I_{nom} = 315...350$ A, namely: $I_n = 310$ A, $U_a = 32$ V. Analysis of current and voltage waveforms showed that in this case, mass transfer occurs in the absence of short circuits in the arc



Fig. 2. Cladded by three electrode bundle deposit layer

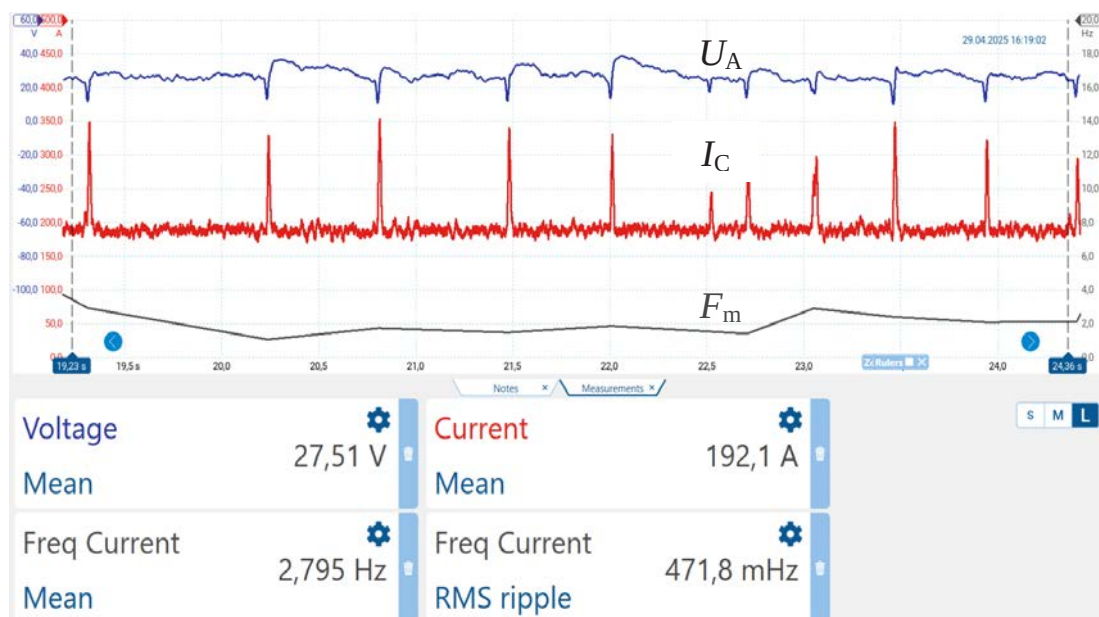


Fig. 3. Waveforms of Arc voltage (U_a), current (I_c), and mass transfer frequency (F_m) graph at surfacing with a single electrode

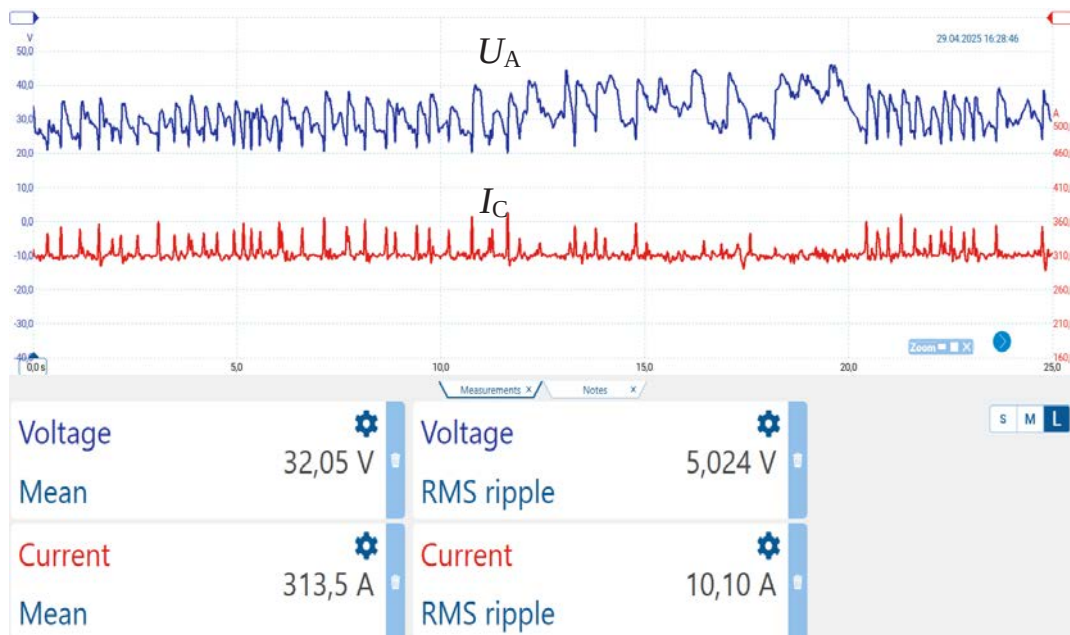


Fig. 4. Waveforms of Arc voltage (U_a), current (I_c), and mass transfer frequency (F_m) graph at surfacing with a bundle of three electrodes

gap. Observed (Fig. 3) irregular current peaks with a multiplicity of less than 1.2 and a decrease in the arc voltage to a minimum value of $U_A = 20$ V, which is much higher than the short-circuit voltage. A sufficiently high coefficient of voltage variation indicates a periodic significant decrease in the arc length, which is explained by the formation of large droplets, which, however, break away from the electrode without a short circuit. Thus, the considered type of mass transfer can be classified according to [1] as G – DROP.

The calculated value of the current coefficient of variation adopted for this type of mass transfer is significantly lower than the permissible limit of 20% and determines the high stability of the electric arc process.

The calculated surfacing capacity in this experiment was 2. kg/h, that is, it exceeded the productivity of surfacing with one electrode by more than 1.6 times and achieved the productivity of mechanized surfacing.

Results. Comparison of the results of the conducted studies confirms the undoubted advantage of the technology of surfacing with a beam of electrodes. In particular, a significant increase in surfacing performance is associated with the possibility of increasing the current density passing through each beam electrode without the risk of overheating of the metal rod. An increase in the current density leads to a more intense dynamic melting of each electrode and, accordingly, to a change in the type of drip mass transfer compared to surfacing with a

single electrode: with short circuits of the arc gap to transfer without short circuits.

The change in the type of mass transfer can be explained by visual observations of the migration of the anode spot of the welding arc between the beam electrodes, similar to the known process of Arc migration during welding with tape electrodes. So, during the initial excitation of the arc, the anode spot is located at the end of the electrode that is located at the minimum distance from the surface of the deposited part. As this electrode melts, the cross-sectional area of the drop formed and removed from the end of the electrode increases, and the arc length increases until, according to the Steenbeck thermodynamic minimum principle, the voltage on the elongated arc does not reach the value of the excitation voltage of the arc process at the end of another electrode. The arc is instantly transferred to the end of the adjacent electrode and then the anode spot cyclically moves between the ends of all the beam electrodes.

The nature of Arc migration and the process of separating the drop from the end of the electrode are evidenced by photographic materials obtained using a specially created video surveillance system. At the same time, the high stability of the arc process is confirmed by the results of calculations of the coefficients of variation of current and voltage. The possibility of obtaining a high permissible arc current density when surfacing with a beam of electrodes makes it possible to bring the surfacing performance to the level of mechanized methods.

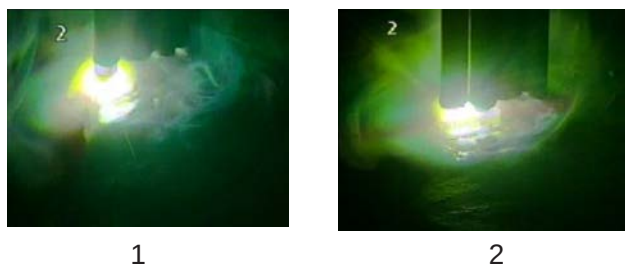


Fig 5. Migration of the welding arc between the beam electrodes

The possibility of obtaining a high permissible arc current density when surfacing with a beam of electrodes makes it possible to bring the surfacing performance to the level of mechanized methods.

Conclusions

1. It is established that when surfacing with a beam of coated electrodes of the T-590 brand,

a drop transfer of the electrode metal occurs without short circuits (Type G according to ISO 4063:2009), in contrast to surfacing with a single electrode, when there is a mass transfer with short circuits of the arc gap (Type D according to ISO 4063:2009).

2. Calculations of the coefficients of variation of parameters characteristic of the studied types of mass transfer, as well as experimentally confirmed the high stability of the electric arc process when surfacing with a beam of three electrodes in comparison with surfacing with a single electrode.

3. The high average beam welding current density $j = 24.7 \text{ A/mm}^2$, which is unattainable for surfacing with a single electrode, makes it possible to bring the surfacing performance closer to the level of mechanized methods.

BIBLIOGRAPHY:

1. ISO 4063:2009 Welding and allied processes – Nomenclature of processes and reference numbers.
2. Pashinskiy V. V., Boiko I. O. Study of the influence of the increased carbon content in electrodes on structure and properties of the welding seam during welding of 110G13 steel. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. Vol. 4 (3 (60)). P. 14–17. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.237358>.
3. Костін О. М., Ярос О. О., Ярос Ю. О., Савенко О. В. Комплекс УПЕ-500 для визначення зварювально-технологічних характеристик покритих електродів. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 8. С. 47–52. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001273673>.
4. Welding Processes Handbook. K Weman. 2nd Edition. November 8, 2011. ISBN: 9780857095183.
5. EN 14700 Welding consumables – Welding consumables for hard-facing.
6. ISO/TR 13393:2009 Welding consumables – Hard-facing classification – Microstructures.
7. Носовський Б. І., Лаврова О. В. Вимоги до зварювальних джерел живлення при наплавленні стрічковим електродом. *Вісник Приазовського державного університету*. Маріуполь, 2009. № 19. С. 192–195.

REFERENCES:

1. International Organization for Standardization. (2009). ISO 4063:2009 Welding and allied processes – Nomenclature of processes and reference numbers. ISO.
2. Pashinskiy, V. V., & Boiko, I. O. (2021). Study of the influence of the increased carbon content in electrodes on structure and properties of the welding seam during welding of 110G13 steel. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (3(60)), 14–17. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.237358>.
3. Kostin, O. M., Yaros, O. O., Yaros, Yu. O., & Savenko, O. V. (2021). Kompleks UPE-500 dlia vyznachennia zvaryvalno-tekhnologichnykh kharakterystyk pokrytykh elektrodov [UPE-500 complex for determining welding-technological characteristics of covered electrodes]. *Avtomatychne zvaryuvannia – The Paton Welding Journal*, (8), 47–52. Retrieved from <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001273673> [in Ukrainian].
4. Weman, K. (2011). *Welding processes handbook* (2nd ed.). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857095183>.
5. European Committee for Standardization (n.d.). EN 14700 Welding consumables – Welding consumables for hard-facing. CEN.
6. International Organization for Standardization (2009). ISO/TR 13393:2009 Welding consumables – Hard-facing classification – Microstructures. ISO.
7. Nosovskyi, B. I., & Lavrova, O. V. (2009). Vymohy do zvaryvalnykh dzherel zhyvlennia pry naplavlenni strichkovym elektrodom [Requirements for welding power sources in strip electrode surfacing]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho universytetu*, (19), 192–195 [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 11.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.54.32.432

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-13>

ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СТАЛЕВІЙ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ СТЕРЕОЛОГІЧНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ

Єфімова Вероніка Гаріївна,

кандидат технічних наук, доцент

доцент кафедри фізичної хімії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

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 Олександр Геннадійович,

викладач циклової комісії з автоматизації металургійного

виробництва та механічного обладнання

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0009-1352-3867

Грудкіна Наталія Сергіївна,

доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-0914-8875

У роботі показано, що неметалічні включення, які утворюються в процесі виробництва сталі, значно впливають на властивості сталі та металопродукції і їх видалення в процесах виробництва сталі, що відіграє головну роль при отриманні продукції високої якості.

Доведено, що для отримання кількісної інформації про розмір та кількість неметалевих включень можна використовувати стереологічний аналіз.

Висвітлено, що «чиста сталь» включає управління вмістом усіх включень, що містяться в сталі, з урахуванням включень, більших, ніж критичний розмір, який відбивається на якості готової продукції.

Показано, що неметалеві сталі в готовому продукті представлені оксидами, при цьому на сьогоднішній день оцінка забрудненості сталі є недостатньою і в окремих випадках має умовний характер.

Установлено, що жодна з чинних шкал, а саме ASTM E45, ISO 4967:1979, SKF та інші, не відображають цілком реального ступеня забрудненості сталі. При цьому дані хімічного аналізу досліджуваних зразків свідчать, що вміст неметалевих включень перевищує на 20–30 % дані, отримані за допомогою використання стандартних металографічних методик.

Висвітлено, що нині велике поширення серед кількісних методів аналізу набули статистичні методи оцінки розмірів та розподілу включень.

Показано, що для всебічної оцінки забрудненості сталі неметалевими включеннями необхідно проводити комплексний аналіз, що містить оцінку їх складу, морфології, розмірів та розподілу.

Показано, що для статистичної оцінки розподілу неметалевих включень за розмірами в роботі розроблено методу, що дає змогу виявляти розподіл великих неметалевих включень у сталій продукції.

З'ясовано, що для виявлення крупних неметалевих включень можна застосовувати логарифмічно нормальний (логнормальний) розподіл еквівалентних діаметрів неметалевих включень, в основі якого лежить мультиплікативний процес формування випадкових величин.

Показано, що для отримання кривої розподілу вся виявлена сукупність неметалевих включень (окремо для сульфідів та оксидів) ділилася за розмірами інтервали, при цьому результати аналізу значно залежали від кількості інтервалів, тобто розмірних груп.

Показано, що з використанням розробленої методики проведено кількісну оцінку забрудненості безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями.

Показано, що в результаті проведених досліджень розроблено методику стереологічної реконструкції розподілу неметалевих включень, що визначає невраховані неметалеві включення розміру, що перевищує критичний.

З'ясовано з проведенням кількісної оцінки забруднення безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями з використанням методики стереологічної реконструкції логнормального розподілу включень за розмірами дає змогу прогнозувати кількість великих неметалевих включень у металевій продукції.

Ключові слова: неметалеві включення, логнормальний розподіл, стереологічна реконструкція, безперервнолиті заготовки.

Yefimova Veronika, Smirnov Yuri, Malii Oleksandr, Hrudkina Nataliia. Assessment of the distribution of non-metallic inclusions in steel products using the stereological reconstruction method

The work shows that non-metallic inclusions formed in the steel production process significantly affect the properties of steel and metal products, and their removal in steel production processes plays a major role in obtaining high-quality products.

It is proven that stereological analysis can be used to obtain quantitative information about the size and number of non-metallic inclusions.

It is highlighted that "clean steel" includes controlling the content of all inclusions contained in steel, taking into account inclusions larger than the critical size, which affects the quality of the finished product.

It is shown that non-metallic steels in the finished product are represented by oxides, while today the assessment of steel contamination is insufficient and in some cases is conditional.

It is established that none of the current scales, namely ASTM E45, ISO 4967:1979, SKF and others, do not fully reflect the real degree of steel contamination [1]. At the same time, the data of chemical analysis of the studied samples indicate that the content of non-metallic inclusions exceeds by 20-30% the data obtained using standard metallographic methods.

It is highlighted that at present, statistical methods for estimating the size and distribution of inclusions have become widespread among quantitative methods of analysis.

It is shown that for a comprehensive assessment of the contamination of steel with non-metallic inclusions, it is necessary to conduct a complex analysis, which includes an assessment of their composition, morphology, size and distribution.

It is shown that for the statistical assessment of the distribution of non-metallic inclusions by size, a method was developed in the work that allows detecting the distribution of large non-metallic inclusions in steel products.

It was found that for the detection of large non-metallic inclusions, a logarithmically normal (lognormal) distribution of equivalent diameters of non-metallic inclusions can be used, which is based on the multiplicative process of forming random variables.

It is shown that to obtain a distribution curve, the entire detected set of non-metallic inclusions (separately for sulfides and oxides) was divided by size intervals, while the analysis results largely depended on the number of intervals, i.e. size groups.

It is shown that using the developed methodology, a quantitative assessment of the contamination of continuously cast billets with non-metallic inclusions was carried out.

It is shown that as a result of the research, a method of stereological reconstruction of the distribution of non-metallic inclusions was developed, which determines unaccounted non-metallic inclusions of a size exceeding the critical one.

It was found that quantitative assessment of the contamination of continuously cast billets with non-metallic inclusions using the method of stereological reconstruction of the lognormal distribution of inclusions by size allows predicting the number of large non-metallic inclusions in metal products.

Key words: non-metallic inclusions, lognormal distribution, stereological reconstruction, continuously cast billets.

Вступ. Головним завданням металургів є видалення неметалевих включень, а також контроль природи й розподілу включень, що залишилися в сталі. Стереологічний аналіз включень у металі може бути використаний для отримання кількісної інформації про їх розмір та кількість.

Так, за даними роботи [1], один кілограм сталі LCAK містить 10^7 – 10^9 включень, зокрема близько 400 розміром 80–130 мкм, десять – 130–200 мкм

і одне-два включення розміром – 200–270 мкм і більше [2; 3]. Дослідження [4] показують, що вміст дрібних включень за кількістю переважає кількість великих, проте повний вміст останніх може бути більшим [5].

Серед металографічних методів одним із поширених методів у практиці заводських лабораторій отримав метод порівняння зі стандартними шкалами, що дає змогу досить швидко оцінити забрудненість сталі неметалевими

включеннями в балах шкали того чи іншої стандарту.

Джерелом інформації про параметри тривимірної структури є двовимірна (площинна) структура перерізу сплаву, що спостерігається на площині шліфу. У цьому елементи просторової структури представлені їх слідами, а мікро-частинка – її перетином.

Так, для всебічної оцінки забрудненості сталі неметалевими включеннями необхідно проводити комплексний аналіз, що містить оцінку їх складу, морфології, розмірів та розподілу. Для статистичної оцінки розподілу неметалевих включень за розмірами нами розроблено методику, що дає змогу зрештою імітувати розподіл великих включень.

Методи та методики дослідження. Мета досліджень:

1) розробити методику стереологічної реконструкції розподілу неметалевих включень, що визначає невраховані неметалеві включення розміру, що перевищує критичний;

2) провести кількісну оцінку забруднення безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями з використанням методики стереологічної реконструкції логнормального розподілу включень за розмірами.

Коли зразок сталі, що містить неметалеві включення, перетинає площину, більшість частинок проходить не через максимальний діаметр, тому видима частина включень має менші розміри (Рис. 1). Отже, вимірювання розміру частинок неметалевих включень, що містяться, матимуть деякий перекид у бік менших розмірів.

Тим часом певним недоліком відомих статистичних методів оцінки забрудненості сталі вважається той факт, що розподіл включень будується тільки на підставі візуального підрахунку включень [7]. Тому кількість певних неметалевих включень буде на 20–30 % нижчою, ніж є насправді.

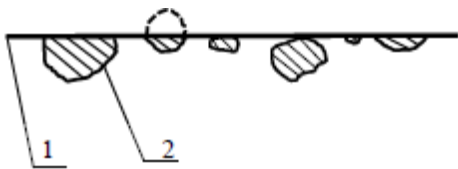


Рис. 1. Число і розміри неметалевих включень на зрізі шліфу

Отже, в кінцевому підсумку одержувана статистична крива розподілу несе інформацію переважно про видиму частину включень.

За даними робіт [8], відомо, що досить достовірно можна вважати гіпотезу про

логарифмічно нормальний (логнормальний) розподіл еквівалентних діаметрів неметалевих включень. В основі логнормального розподілу лежить мультиплікативний процес формування випадкових величин, тобто процес, у якому дія кожного додаткового чинника на випадкову величину пропорційна досягнутому рівню [9; 10]. Функція густини логнормального розподілу описується виразом:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{\ln x} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma_{\ln x}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

де μ та $\ln x$ – відповідно середнє арифметичне значення та середньоквадратичне відхилення логарифмів.

При цьому кінцева інформація про чистоту сталі подається у вигляді кривої розподілу еквівалентних діаметрів неметалевих включень, отриманих на підставі статистичної оцінки.

У роботі оцінка забрудненості проводилася на оптичному металографічному мікроскопі Neophot зі збільшенням $\times 300$. Оцінюючи забрудненість шліфу діаметром 10 мм, підрахунок неметалевих включень проводився дільниці розміром 4×4 мм. Досліджуване поле становило 5 % площі поверхні шліфу. Вибір досліджуваного поля зумовлений необхідністю фіксувати як дрібні, а й більші включення, з метою забезпечення об'єктивності аналізу. Зазначена площа набирається 64 мікрофотографія 500×500 мкм. Далі з використанням аналізатора зображення Thixomet PRO необхідна площа, що відповідає розміру поля зору, видимого в окуляри мікроскопа при збільшенні $\times 100$, збиралася послідовним прецизійним склейкою «на льоту» суміжних полів зору. Так, отримано панорамне зображення структури площі досліджуваного шліфу. Весь цикл вимірювань містив такі дії: виготовлення панорами ділянки шліфу; детектування включень; поділу включень за типами та розмірами.

Для отримання кривої розподілу вся виявлена сукупність неметалевих включень (окремо для сульфідів та оксидів) ділилася за розмірами інтервали. Результати аналізу значно залежали від кількості інтервалів, тобто розмірних груп, як встановлено в роботах [7; 8]. Верхня межа, як і середнє значення кожного наступного інтервалу, виходить множенням попереднього значення на коефіцієнт, рівний $\sqrt{2} = 1,41$ для розподілу еквівалентних діаметрів.

За отриманими емпіричними даними (Y_{zi}) визначають теоретичні частоти (Y_{Ti}) логнормального розподілу. При розрахунках використовують не центри інтервалів, (X_i), а їх верхні межі (X'_i) [8].

Перевірка відповідних вихідних емпіричних даних логнормальному закону розподілу здійснювалася за критеріями χ^2 , λ та медіанному критерію Me [10].

При розробці математичної моделі для отримання доповненої кривої логнормального розподілу розмірів неметалевих включень використовується така схема:

– усі значення частот відповідних еквівалентних діаметрів неметалевих включень зліва від максимального значення вихідної теоретичної кривої залишаються незмінними, оскільки ці включення досить легко фіксувати за допомогою оптичного мікроскопа;

– розширення починали з точки, що відповідає максимальній частоті включень за такою формулою:

$$Y'_j = Y_{\max} + z \cdot N_1, \quad (2)$$

– розширення низхідної частини кривої:

$$Y'_j = Y'_{j-1} + z \cdot N_i \quad (3)$$

– розширення висхідної частини вихідної кривої:

$$Y'_j = Y'_{j-1} - z \cdot N_i \quad (4)$$

де Y'_j – частота включень у доповненій кривій розподілу; $Y_{\max}$ – максимальна частота включень у вихідній теоретичній кривій розподілу; – крок розширення кривої; N_i – коефіцієнти розширення кривої, що вибирають відповідно до матриці $LN-A$ і $LN-G$.

З використанням розробленої методики нами проведено кількісну оцінку забрудненості безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями сталі марки 45 з використанням продування через кільцеву фурму й без неї. Метал розлитий без продування аргонем – дослідний, а із застосуванням продування – порівняльний. Під час аналізу враховували оксиди, що виділилися в самостійній фазі. Мінімальний діаметр виявлених при використанні мікроскопа включень оксидів дорівнює 2 мкм, а максимальний не перевищував 60–65 мкм. На рис. 2 а, б



а)

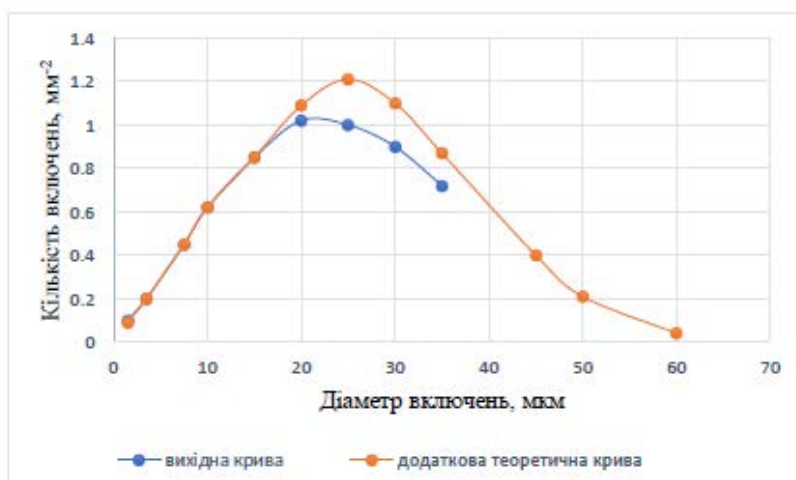


Рис. 2. Розподіл розмірів оксидів у зразках безперервнолитої заготовки:
а – порівняльний метал; б – дослідний метал

показані вихідні та доповнені розподілу розмірів оксидів.

Так, при використанні методики стереологічної реконструкції розподілу неметалевих включень виявлено, що неврахованими залишилися в середньому близько 40 % великих включень у порівняльному металі та 15 % у дослідному. Отримано залежності розподілу оксидів у відлитому металі рис. 4 а, б, дані яких свідчать, що цей метод дає змогу виявити великі включення, які виявляються традиційними металографічними методами. Із цих рис. 4 а, б, що в дослідному металі залишилися неврахованими в середньому близько 40 % великих включень, а в порівняльному – 15 %.

Висновки. У результаті проведених досліджень розроблено методику стереологічної реконструкції розподілу неметалевих включень, що визначає невраховані неметалеві включення розміру, що перевищує критичний.

Проведення кількісної оцінки забруднення безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями з використанням методики стереологічної реконструкції логнормального розподілу включень за розмірами показало, що її використання дає змогу прогнозувати кількість великих неметалевих включень у металевій продукції.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zhang L., Ren Y. Handbook of non-metallic inclusions in steel. 2025. Springer Singapore. Hardcover XIII, 816 p.
2. Zhang X., Wang Z., Wang W., Zhang H., Zhang L. Control of non-metallic inclusions and micro-structure of an Al-killed steel through adjusting titanium content. *Journal of materials research and technology*. 2025. Vol. 35. № 2. P. 5629–5636.
3. Weitao L., Fapu W., W. Guangfu, Huajun, W. Kaimin, J. Xingyu Haiyan characteristics and evolution of non-metallic snclusions in metallurgical production of GCr15 bearing steel. *Special steel*. 2025. Vol. 46. № 1. P. 79–86.
4. She C., Zhu L., Ren Y., Sun Y., Zhang L. Control of steel cleanliness and non-metallic inclusions in an Al-killed steel through CaO-Al₂O₃ powder injection during RH refining process. *Metallurgical research and technology*. 2025. Vol. 122. № 4. P. 342–354.
5. Zhao Y., Ren G., Chen L., Zhu J., Zhao A. Influence of non-metallic inclusions on very high-cycle fatigue performance of high-strength steels and interpretation via crystal plasticity finite element method. *Metals*. 2024. Vol. 14(8). № 6. P. 948–966.
6. Imashuku S. Three_dimensional imaging of non-metallic snclusions in steel using Ionoluminescence. *Metallurgical and materials transactions B*. 2024. Vol. 55. № 5. P. 2459–2466.
7. Lipinski T. Analysis of the Distribution of non-metallic inclusions and its impact on the fatigue strength parameters of carbon steel melted in an electric furnace. *Materials*. 2024. Vol. 17 (24). P. 6151–6169.
8. Muhammed S., Tao X., Ren D., Zhang H. 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. 00(00). P. 1–9.
9. Zavdoveev A., Zrodowski A., Cortes V., Choma V., Ostrysz T., Stasiuk M., Skoryk O., Skoryk M. Atomization of the Fe-rich MnNiCoCr high-entropy alloy for spherical powder production. *Materials Letters*. 2024. Vol. 363. P. 234–244.
10. Xu G., Liang S., Song B., Liu W., Yang S., Zhao L., Zhang Y. Influence of refining slag composition on nonmetallic inclusions in 38CrMoAl steel. *Journal of materials research and technology*. 2025. Vol. 34. № 1. P. 209–219.

REFERENCES:

1. Zhang, L., & Ren, Y. (2025). Handbook of non-metallic inclusions in steel. 2025. Springer Singapore. Hardcover XIII, 816p.
2. Zhang, X., Wang, Z., Wang, W., Zhang, H., & Zhang, L. (2025). Control of non-metallic inclusions and micro-structure of an Al-killed steel through adjusting titanium content. *Journal of materials research and technology*, 35(2), 5629–5636.
3. Weitao, L., Fapu, W., W. Guangfu, Huajun, W. Kaimin, J. Xingyu (2025). Haiyan characteristics and evolution of non-metallic snclusions in metallurgical production of GCr15 bearing steel. *Special steel*, 46(1), 79–86.
4. She, C., Zhu, L., Ren, Y., Sun, Y., & Zhang, L. (2025). Control of steel cleanliness and non-metallic inclusions in an Al-killed steel through CaO-Al₂O₃ powder injection during RH refining process. *Metallurgical research and technology*, 122(4), 342–354.

5. Zhao, Y., Ren, G., Chen, L., Zhu, J., & Zhao, A. (2024). Influence of non-metallic inclusions on very high-cycle fatigue performance of high-strength steels and interpretation via crystal plasticity finite element method. *Metals*, 14(8), № 6, 948–966.
6. Imashuku, S. (2024). Three-dimensional imaging of non-metallic inclusions in steel using lonoluminescence. *Metallurgical and materials transactions B*, 55(5), 2459–2466.
7. Lipinski, T. (2024). Analysis of the Distribution of non-metallic inclusions and its impact on the fatigue strength parameters of carbon steel melted in an electric furnace. *Materials*, 17(24), 6151 – 6169.
8. Muhammed, S., Tao, X., Ren, D., & Zhang, H. (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*, 00(00), 1–9.
9. Zavdoveev, A., Zrodowski, A., Cortes, V., Choma, V., Ostrysz, T., Stasiuk, M., Skoryk, O., & Skoryk, M. (2024). Atomization of the Fe-rich MnNiCoCr high-entropy alloy for spherical powder production. *Materials Letters*, 363, 234–244.
10. Xu G., Liang S., Song B., Liu W., Yang S., Zhao L., Zhang Y. (2025). Influence of refining slag composition on nonmetallic inclusions in 38CrMoAl steel. *Journal of materials research and technology*, 34(1), 209–219.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 621.74.044:669.715

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-14>

ВАКУУМУВАННЯ ПРЕС-ФОРМИ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ВИЛИВКІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ ЛИТТІ ПІД ТИСКОМ

Крейцер Кирилл Олександрович,

кандидат технічних наук,

старший викладач Навчально-наукового інституту морського флоту

Одеського національного морського університету

ORCID ID: 0000-0002-0549-1481

Козішкурт Євген Миколайович,

доктор філософії,

старший викладач Навчально-наукового інституту морського флоту

Одеського національного морського університету

ORCID ID: 0000-0002-7311-7395

У статті представлено результати комплексного експериментального дослідження впливу вакуумування прес-форми на герметичність виливків з алюмінієвих сплавів при литті під тиском. Детально проаналізовано залежність виникнення внутрішніх дефектів, як-от пористість, газові включення та непроливи, від рівня залишкового тиску в порожнині форми перед упресуванням розплаву. Установлено, що зниження тиску до 80–100 мбар суттєво зменшує імовірність утворення дефектів, особливо в тонкостінних деталях, що є критично важливим для забезпечення надійності, міцності, довговічності та експлуатаційної стабільності виробів. Експериментальні дослідження проводили на модернізованому промисловому ливарному обладнанні з інтегрованою вакуумною системою, цифровим моніторингом тиску та температури в режимі реального часу, а також з адаптивним керуванням технологічними параметрами, що забезпечувало стабільність процесу та точний контроль усіх параметрів лиття. Показано, що застосування вакуумування дає змогу знизити частку бракованих виробів із 7,2 % до 2,9 %, забезпечуючи рівномірне заповнення форми без утворення повітряних кишень та дефектів поверхні. Поєднання вакуумного режиму із цифровим контролем параметрів сприяє формуванню щільної мікроструктури з мінімальною пористістю та підвищує герметичність, міцність і надійність виробів, особливо складних корпусних деталей з підвищеними вимогами до якості. Результати дослідження підтверджують ефективність інтеграції вакуумного обладнання в промисловий процес лиття під тиском як надійного, економічно доцільного та технологічно обґрунтованого засобу підвищення якості продукції, стабілізації процесу та забезпечення високої точності виготовлення деталей у серійному виробництві.

Ключові слова: лиття під тиском, вакуумування, алюмінієві сплави, герметичність, дефекти виливків, пористість, тиск у формі, модернізація, автоматизація.

Kreitser Kyrill, Kozishkurt Evgeny. Vacuuming of the die mold as a factor for improving the tightness of aluminum alloy castings in pressure die casting

The article presents the results of a comprehensive experimental study on the influence of mold vacuuming on the tightness of aluminum alloy castings produced by pressure die casting. The dependence of internal defect formation, including porosity, gas inclusions, and misruns, on the level of residual pressure in the mold cavity prior to melt injection was analyzed in detail. It was established that reducing the pressure to 80–100 mbar significantly decreases the likelihood of defect formation, particularly in thin-walled components, which is critically important for ensuring the reliability, strength, durability, and operational stability of the castings. Experimental investigations were carried out on modernized industrial casting equipment equipped with an integrated vacuum system, digital real-time monitoring of pressure and temperature, and adaptive control of technological parameters, ensuring process stability and precise control of all casting parameters. The study demonstrated that the application of vacuuming reduces the proportion of defective castings from 7.2 % to 2.9 %, providing uniform mold filling without air pockets or surface defects. The combination of vacuum mode with digital process control promotes the formation of a dense microstructure with minimal porosity and enhances the tightness, mechanical performance, and reliability of castings, especially complex structural components with high-quality requirements. The results confirm the effectiveness of integrating vacuum equipment into the industrial die casting process as a reliable, economically feasible, and technologically justified approach to improving product quality, stabilizing the production process, and ensuring high dimensional accuracy of serially manufactured components.

Key words: high-pressure die casting, vacuuming, aluminum alloys, tightness, casting defects, porosity, mold pressure, modernization, automation.

Вступ. Проблема забезпечення герметичності виливків з алюмінієвих сплавів, отриманих методом лиття під тиском, на сьогоднішній день не втрачає актуальності, особливо в умовах серійного виробництва складних корпусних деталей для автомобільної, електротехнічної та авіаційної промисловості. На тлі постійного посилення вимог до якості, надійності й довговічності виробів, навіть незначні внутрішні дефекти, зокрема пори, мікропустоти, непроливи чи газові включення, можуть стати критичними щодо подальшої експлуатації виробу. У багатьох випадках саме мікропористість спричиняє зниження міцності з'єднань, зменшення опору до втоми, а також втрату герметичності в умовах високих температур або тиску [1; 2].

Попри те що сучасне лиття під тиском забезпечує високий рівень точності та повторюваності, без додаткових технологічних заходів важко гарантувати відсутність повітря в порожнині прес-форми під час упорскування розплаву. Одним із найбільш дієвих способів подолання цього недоліку визнано вакуумування – процес створення розрідження в ливарній формі безпосередньо перед заповненням її розплавом [3; 4].

Наукова новизна роботи полягає в установленні кількісної залежності між рівнем залишкового тиску в порожнині прес-форми (80–100 мбар) та зниженням частки дефектних виливків з алюмінієвих сплавів, підтвердженій експериментальними даними на серійному ливарному обладнанні. На відміну від попередніх досліджень, у роботі вперше здійснено комплексне поєднання вакуумного режиму із цифровим контролем тиску й температури в реальному часі, що дало змогу визначити оптимальні параметри «вакуум – інжекція» для $AlSi9Mn$ та $AlSi9Cu3(Fe)$ у промислових умовах. Запропонований підхід забезпечив подвоєння герметичності (до $>1,2$ МПа) та зниження пористості до 2,8 %, що не було кількісно описано в дослідженнях інших авторів.

Дослідження останніх років підтверджують, що застосування вакуумування в процесі лиття під тиском має суттєвий позитивний вплив на якість отриманих виливків. Найперше йдеться про підвищення ефективності заповнення прес-форми, особливо у випадках складної геометрії або наявності тонкостінних ділянок, де традиційне лиття часто не забезпечує достатньої плинності розплаву. Створення розрідженого середовища в порожнині форми дає змогу значно зменшити опір, який чинить повітря при русі фронту металу, а отже, імовірність утворення повітряних кишень або пасток газу значно знижується. Це, своєю чергою, мінімізує

виникнення таких дефектів, як непроливи, внутрішні пори й пористість поверхні, що особливо важливо для відповідальних литих компонентів, де високі вимоги до герметичності та однорідності матеріалу [5; 6].

Результати експериментів із використанням сплавів системи $Al-Si-Mg$ у режимі надвисокого вакуумування показали, що щільність і цілісність мікроструктури виливків суттєво покращується. Спостерігалось підвищення механічних характеристик – зокрема, міцності на розтяг і межі плинності – на 20–25 % порівняно з виробами, отриманими без застосування вакуумного режиму. Такий результат зумовлений відсутністю газових включень та зменшенням кількості внутрішніх мікропорожнин, які зазвичай формуються за наявності повітря в закритих зонах прес-форми [7].

Однак досягнення стабільного ефекту вакуумування не є тривіальним завданням і вимагає узгодження низки технологічних параметрів. Як показують дослідження, важливу роль відіграє точне часове узгодження моменту створення вакууму з початком упорскування. Якщо евакуація повітря не завершена повністю або відбувається із затримкою, ефективність вакуумного режиму суттєво знижується. Крім того, температурний стан прес-форми безпосередньо впливає на динаміку заповнення: надто холодна форма може спричинити передчасне затвердіння фронту розплаву, тоді як перегрів зменшує в'язкість сплаву, ускладнюючи контроль за процесом [8].

Не менш значущим чинником є швидкість руху плунжера, яка повинна бути адаптована до умов вакуумування. Надто повільне упорскування не забезпечує повного витіснення залишкового повітря, тоді як надто швидко може спричинити турбулентність, втрату спрямованості потоку та виникнення зворотних завихрень, що призводить до вторинного захоплення газу. Так, ключовим є дотримання узгодженого режиму «вакуум – інжекція» з точним контролем усіх динамічних параметрів, що забезпечує формування якісного виливка без критичних внутрішніх дефектів [9].

Технічна реалізація вакуумування передбачає встановлення систем відсмоктування повітря або газових сумішей через спеціальні вакуум-канали, зворотні клапани або автоматизовані клапанні блоки із сенсорною підтримкою. Використання таких пристроїв дає змогу забезпечити контрольований тиск у формі до моменту заповнення її розплавом, що значно знижує ризики формування мікропор [10]. У сучасних високоточних ливарних машинах

передбачено автоматизовану взаємодію між вакуумною системою та системою керування процесом упорскування. Це дає змогу змінювати параметри в реальному часі відповідно до сигналів із сенсорів тиску та температури, що значно підвищує надійність процесу [11].

Водночас варто зазначити, що ефективність вакуумування не є універсальною і потребує адаптації до кожного конкретного технологічного режиму. У низці робіт [12; 13] наголошується, що надто глибоке розрідження може призвести до передчасного охолодження фронту розплаву або утворення вакуумного «замикання» при складній геометрії порожнини. Так, проблема полягає не лише в досягненні розрідженого стану, а й у формуванні стійкого, керованого вакуумного поля, яке узгоджується з фазами впорскування і заповнення.

Питання збереження герметичності виливків у таких умовах пов'язане не тільки з наявністю пор, а й з мікроструктурними дефектами, які можуть виникати через термічний шок або локальні зони недоплаву. У цьому контексті вакуумування розглядається не як самостійна операція, а як інтегрований елемент цифрової системи керування ливарним процесом, що діє у зв'язку з іншими параметрами технологічного середовища – температурою розплаву, швидкістю плунжера, конфігурацією каналу литника [14].

Низка авторів [15; 16] зазначають, що зниження тиску нижче 70–80 мбар може погіршувати умови заповнення через зростання турбулентного складника. Це свідчить про наявність «критичного» рівня вакууму, який залежить від сплаву, конфігурації форми та швидкості впорскування. Однак для промислових умов лиття сплавів AlSi9Mn та AlSi9Cu3(Fe) ці межі в літературі висвітлені недостатньо, що й зумовлює актуальність проведеного нами дослідження.

Мета роботи – визначити вплив вакуумування прес-форми на герметичність виливків з алюмінієвих сплавів та обґрунтувати оптимальні режими вакуумування з урахуванням параметрів лиття. Особливу увагу приділено взаємодії вакуумної підсистеми з адаптивними цифровими контролерами, які регулюють хід упорскування залежно від сигналів із сенсорів тиску та температури. Експерименти проводили на базі модернізованої машини лиття під тиском із підтримкою вакуумного відведення та контролю фазового розрідження.

Так, дослідження зосереджується на практичному вимірі ефективності вакуумування при литті алюмінієвих сплавів, орієнтуючись на підвищення герметичності виливків без втрати продуктивності або ускладнення технології.

Результати дослідження можуть бути корисними для фахівців, що займаються автоматизацією ливарного виробництва, проектуванням прес-форм та оптимізацією технологічних режимів.

Методи та методики дослідження. Для визначення впливу вакуумування порожнини прес-форми на герметичність виливків з алюмінієвих сплавів організовано серію лабораторно-виробничих експериментів на ливарному устаткуванні, модернізованому під роботу у вакуумному режимі. Дослідження проводили з використанням сплаву AlSi9Mn – одного з найбільш поширених у виготовленні відповідальних корпусних деталей. Основна увага приділялася зміні частки дефектних виробів залежно від залишкового тиску в прес-формі перед упорскуванням розплаву. Результати роботи пройшли промислові випробування в BAMAX Poland Sp.zoo, Польща та в Державному підприємстві «Інженерний центр литва під тиском», Україна.

Результати та дискусії. На основі експериментальних даних встановлено інтервал технологічної стійкості вакуумування: при тиску 80–100 мбар забезпечується мінімальна пористість та стабільне заповнення форми, тоді як подальше зниження тиску (<80 мбар) призводить до збільшення турбулентності, нерівномірного витіснення повітря та підвищеної імовірності газових включень. Це дає змогу визначити умовно «критичний» рівень вакууму для досліджених сплавів у межах 70–80 мбар, що узгоджується з тенденціями, відображеними в науковій роботі [17].

Процес лиття здійснювався на серійній горизонтальній машині лиття під тиском, до якої інтегровано вакуумний тракт з електронним клапаном, цифровим манометром та системою контролю тиску в реальному часі. Заміри проводили для п'яти рівнів залишкового тиску: атмосферний (≈ 1000 мбар), 300 мбар, 200 мбар, 100 мбар і 80 мбар. На кожному етапі фіксувалися показники герметичності на партії з не менш як 100 відливок.

Якість виливків оцінювали за допомогою оптичного контролю, капілярної дефектоскопії та рентгенографії. За результат браку вважали виливки з ознаками газових пор, усадочних раковин, поверхневої пористості або непроливів. Окрім цього, реєстрували температури розплаву, температури стінок прес-форми та параметри тиску впорскування, що дало змогу врахувати вплив супутніх технологічних факторів на якість відливки.

Отримані дані були статистично оброблені та відображені у вигляді графіка залежності

частки дефектних виробів від залишкового тиску у формі (рис. 1).

Як видно з рис. 1, при зниженні тиску нижче 200 мбар спостерігається чітке зменшення кількості браку: з 7,2 % за відсутності вакуумування до 2,9 % при досягненні рівня 80–100 мбар. Це дало змогу визначити оптимальний інтервал вакуумування, за якого досягається максимальне зниження кількості дефектів без ускладнення процесу лиття.

У процесі експериментів досліджено вплив вакуумування порожнини прес-форми на якість литих виробів з алюмінієвого сплаву AlSi9Cu3(Fe) в умовах високоточного лиття під тиском. Основний акцент зроблено на кількісній оцінці зменшення кількості дефектів, як-от усадкова пористість, газові включення та непроливи, залежно від залишкового тиску в порожнині форми перед упорскуванням розплаву.

Як видно з рис. 2, зі зниженням залишкового тиску перед упорскуванням від 0,6 до 0,1

бара частка бракованих виливків монотонно зменшується з 18,2 % до 4,3 %. Залежність має майже лінійний характер у дослідженому діапазоні, що свідчить про стабільне зниження ймовірності утворення газових та усадкових дефектів при поглибленні вакуумування. При тиску 0,1–0,2 бара спостерігається найбільший градієнт зменшення браку, що вказує на підвищену чутливість процесу заповнення до наявності повітря у формі. У зоні 0,4–0,6 бара зміна дефектності поступово стабілізується, що узгоджується з переходом від турбулентного до більш керованого режиму заповнення. Це підтверджує ефективність видалення повітря, що створювало би газові пастки, особливо у вузьких каналах та тонкостінних зонах деталі. Подібні ефекти описані й у роботах закордонних авторів, зокрема в дослідженні [14], де наголошується на критичності фазового заповнення за високої швидкості впорскування. Під час випробувань проводився також аналіз

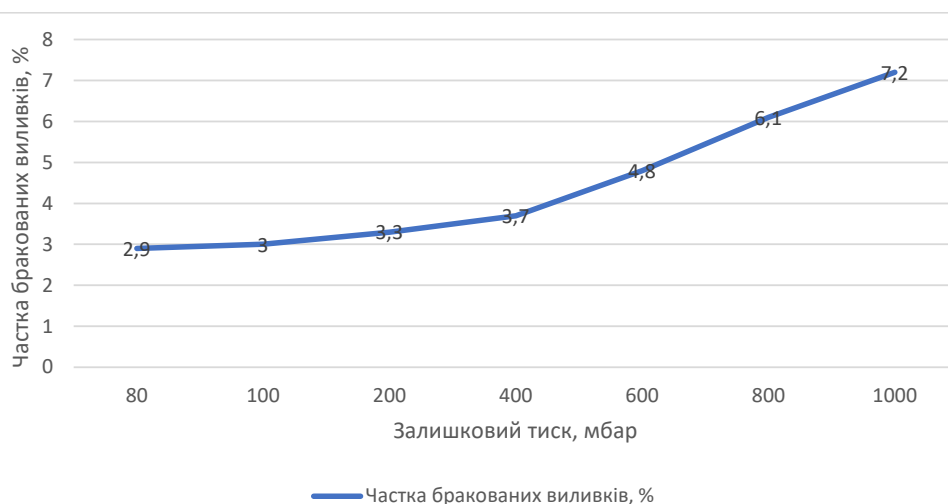


Рис. 1. Залежність кількості дефектів від рівня вакууму

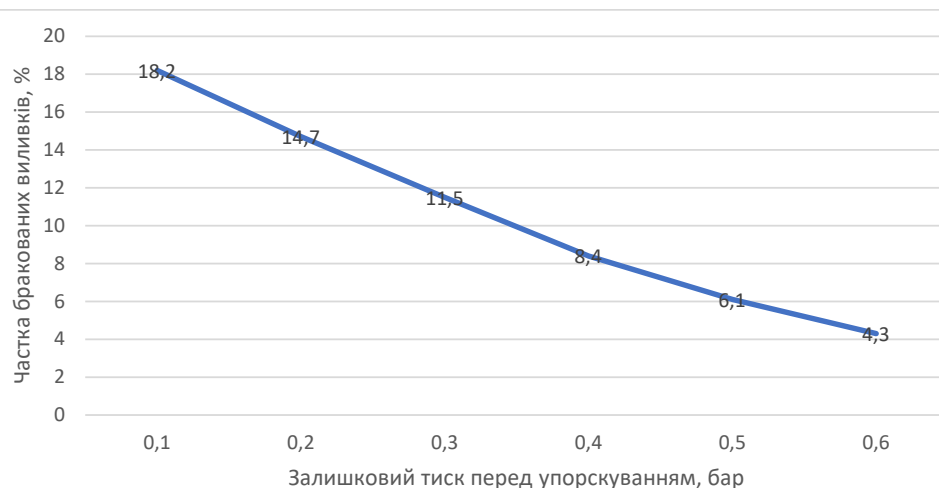


Рис. 2. Вплив залишкового тиску перед упорскуванням на частку дефектних виливків, %

температурного режиму прес-форми та його взаємозв'язку з герметичністю готових виливків. Як показано на рис. 3, найбільш стабільні результати досягали за температури форми в межах 225–235 °С. Перегрів до понад 250 °С призводив до формування усадочних пустот, що корелює з підвищеною інерційністю охолодження й утворенням локальних зон перегріву. Натомість температура нижче 210 °С знижувала плинність розплаву, що проявлялося у вигляді непроливів і дефектів заповнення.

Водночас досліджено кінетику процесу лиття: швидкість плунжера на момент упорскування становила 1,8–2,2 м/с, тиск упорскування – 65–75 МПа, а час витримки під тиском – 9–12 с. Саме поєднання контрольованого тиску й вакуумного режиму створювало умови для утворення рівномірної структури без мікропустот. У публікації [15] описано подібний ефект для сплавів AlSi10MnMg, де якість виливків покращувалася при поєднанні високої швидкості впорскування з мінімальним умістом повітря в порожнині.

Порівняння структури зламів бракованих і придатних виливків, виконане методом оптичної мікроскопії, показало чітку різницю в пористості (до 9 % у випадку без вакууму проти 2–3 % з вакуумуванням). Ці результати підтверджують висновки дослідження [16], де покращення якості лиття досягалося шляхом оптимізації геометрії системи лиття, але водночас підкреслювалась важливість чистоти газового середовища.

Емпірична обробка результатів показала, що залежність частки пористості P від залишкового

тиску p у дослідженому діапазоні може бути апроксимована степеневою формою:

$$P = k \cdot p^n,$$

де для сплаву AlSi₉Mn отримано $k = 0,012$ та $n \approx 0,82$. Це узгоджується з тенденціями, наведеними в роботах [15; 16]

На основі отриманих даних сформовано узагальнену таблицю основних параметрів та результатів (таблиця 1).

Таблиця 1

Порівняльні показники якості виливків при використанні та відсутності вакуумування

Параметр	Без вакуумування	З вакуумуванням
Частка бракованих виливків, %	7,2	2,9
Середній рівень пористості, %	9,1	2,8
Герметичність (випробування тиском), МПа	≤0,6	>1,2
Коефіцієнт повторюваності якості (RSD), %	6,4	2,2

Узагальнені результати, подані в Таблиці 1, чітко демонструють позитивний вплив вакуумування на якість виливків. Вакуумний режим забезпечує суттєве скорочення дефектності, стабільніше заповнення порожнини форми та мінімізацію газових включень порівняно зі стандартним циклом лиття. Зниження середнього рівня пористості з понад 9 % до менш ніж 3 % підтверджує формування однорідної

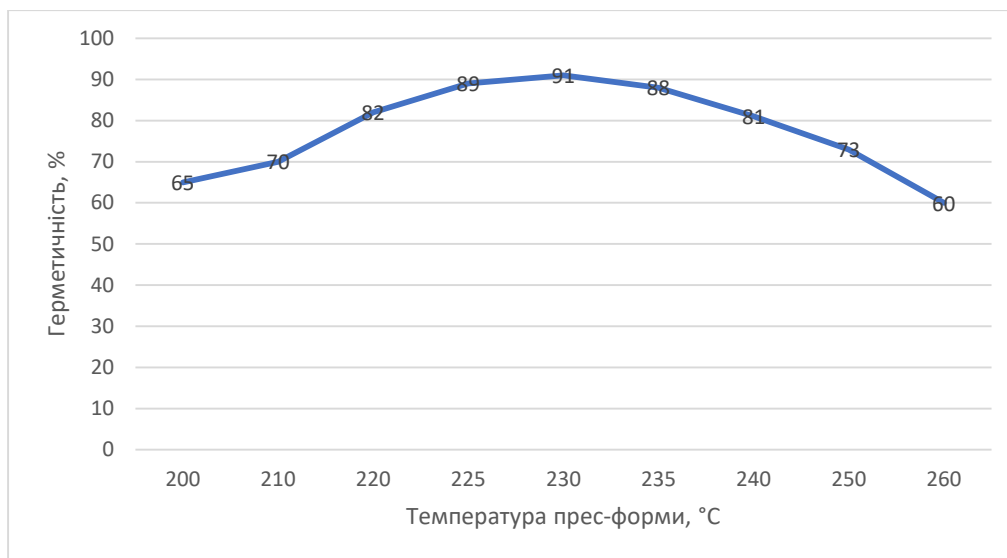


Рис. 3. Залежність рівня герметичності виливків від температури прес-форми

мікроструктури без мікропустот, а підвищення герметичності до понад 1,2 МПа свідчить про покращення щільності та структури матеріалу. Водночас зменшення коефіцієнта варіації майже втричі вказує на підвищення технологічної стабільності та повторюваності процесу лиття у вакуумному режимі, що є важливою перевагою для серійного виробництва.

Окремо варто звернути увагу на зменшення коефіцієнта варіації результатів (RSD) – з 6,4 % до 2,2 %. Це означає, що процес став не лише якіснішим, а й більш стабільним у повторних циклах. Така однорідність особливо важлива в умовах безперервного виробництва, де мінімізація коливань забезпечує економію ресурсів і стабільність кінцевого продукту. Загалом, усі наведені параметри свідчать про практичну доцільність упровадження вакуумування в цикл лиття, особливо при виробництві герметичних або тонкостінних деталей із підвищеними вимогами до якості поверхні та внутрішньої структури. Проведене дослідження доводить, що інтеграція вакуумного тракту до циклу лиття під тиском дає змогу істотно знизити частку дефектів без негативного впливу на продуктивність чи собівартість процесу. Результати можуть бути рекомендовані до впровадження в серійне виробництво відповідальних корпусних елементів, де критичне значення має герметичність та щільність металу.

Хоча такі технології були раніше впроваджені у виробництві магнієвих виливків (див. [8]), наше дослідження адаптує ці підходи до алюмінієвих сплавів і підкріплює їх конкретними кількісними показниками. Це надає можливість удосконалити систему контролю й зниження частоти відмов у критично навантажених деталях.

Висновки. Експериментальні дослідження підтверджують, що вакуумування порожнини прес-форми істотно підвищує якість литих виробів з алюмінієвих сплавів. Зафіксовано чітку тенденцію до зменшення дефектності та

пористості, що супроводжується формуванням щільнішої та більш однорідної мікроструктури. Виявлений оптимальний діапазон залишкового тиску 80–100 мбар забезпечує стабільне заповнення форми без утворення повітряних пасок і дефектів, характерних для тонкостінних і складноконтурних ділянок деталей.

Результати випробувань герметичності демонструють суттєве підвищення опірності литих виробів до внутрішнього тиску, що свідчить про підсилення структурної цілісності матеріалу та відсутність макро- й мікропорожнин. Зменшення коефіцієнта варіації (RSD) вказує на підвищення повторюваності та стабільності процесу лиття при застосуванні вакуумного режиму, що є важливим фактором у серійному виробництві відповідальних корпусних елементів.

Температурний режим прес-форми відіграє визначальну роль у забезпеченні герметичності: найменша кількість дефектів зафіксована в інтервалі 225–235 °С. Відхилення від цих меж призводить до зниження плинності розплаву або формування усадочних пустот через локальні зони перегріву. Поєднання вакуумування із цифровим контролем температури та тиску забезпечує керовану кінетику заповнення, що підвищує стабільність процесу та якість відливок.

З теоретичного боку отримані результати уточнюють механізм впливу вакуумування на структуру виливків. Зниження залишкового тиску в порожнині форми мінімізує стискання газів перед фронтом розплаву, усуває турбулентні зони та забезпечує більш ламінарний характер заповнення. Це сприяє рівномірному витісненню повітря й запобігає зародженню мікропор у ділянках з уповільненою кристалізацією. Так, дослідження розширює наукові уявлення про формування пористості при високошвидкісному литті під тиском та демонструє, що контроль фазового режиму «вакуум – інжекція» є критичним чинником для отримання щільної та герметичної структури алюмінієвих сплавів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Pidgurskyi M., Pidgurskyi I., Stashkiv M., Ihnatieva V., Danylchynko S., Bykiv D., Pidluzhnyi O. Peculiarities of studying the stress-strain state of structural steel perforated beams using the finite element method. *Scientific Journal of TNTU*. 2023. Vol. 111(3). P. 126–138. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.126.
2. Niu Z., Liu G., Li T., Ji S. Effect of high pressure die casting on the castability, defects and mechanical properties of aluminium alloys in extra-large thin-wall castings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022. Vol. 303. Article ID 117525. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117525>.
3. Nunes H., Emadinia O., Vieira M. F., Reis A. Low-and High-Pressure Casting Aluminum Alloys: A Review. *Recent Advancements in Aluminum Alloys*. 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109869>.
4. Réger M., Horváth R., Fábíán E.R., Réti T. Modelling the impregnation of a pressure-tight casting. *International Journal of Metalcasting*. 2025. Vol. 19(1). P. 165–175. <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01272-1>.

5. Li D., Slater C., Cai H., Hou X., Li Y., Wang Q. Joining technologies for aluminium castings – A review. *Coatings*. 2023. Vol. 13(5). Article 958. <https://doi.org/10.3390/coatings13050958>.
6. Gyarmati G., Kéri Z., Mende T., Molnár D. Analysis of the quality of incoming AlSi9Mn alloy ingots. *International Journal of Metalcasting*. 2024. Vol. 18(2). P. 1723–1738. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01146-y>.
7. Yang J., Liu B., Shu D., Li H., Yang Q., Hu T., Tang X. Effect of ultra vacuum assisted high pressure die casting on the mechanical properties of Al-Si-Mn-Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. Vol. 1026. Article ID 180531. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180531>.
8. Kan M., Ipek O., Koru M. An investigation into the effect of vacuum conditions on the filling analysis of the pressure casting process. *International Journal of Metalcasting*. 2023. Vol. 17(1). P. 430–446. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00770-4>.
9. Trometer N., Godlewski L.A., Prabhu E., Schopen M., Luo A.A. Effect of vacuum on die filling in high pressure die casting: water analog, process simulation and casting validation. *International Journal of Metalcasting*. 2024. Vol. 18(1). P. 69–85. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01002-z>.
10. Stalnichenko O., Lysenko T., Ponomarenko O., Kreitzer K., Kozishkurt E. Vacuum technology for magnesium alloys during die casting of radiators. *Advanced Manufacturing Processes VI*. Cham: Springer, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_20.
11. Soares G., Neto R., Madureira R., Soares R., Silva J., Silva R.P., Araújo L. Characterization of Al alloys injected through vacuum-assisted HPDC and influence of T6 heat treatment. *Metals*. 2023. Vol. 13(2). Article 389. <https://doi.org/10.3390/met13020389>.
12. Jiao X. Y., Zhang Y. F., Wang J., Nishat H., Liu Y. X., Liu W. N., Xiong S. M. Characterization of externally solidified crystals in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy and their effect on porosities and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 298. Article ID 117299. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117299>.
13. Réger M., Horváth R., Fábián E. R., Réti T. Impregnation problems of aluminum castings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 1313(1). Article ID 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1313/1/012007>.
14. Liu W., Peng T., Kishita Y., Umeda Y., Tang R., Tang W., Hu L. Critical life cycle inventory for aluminum die casting: A lightweight-vehicle manufacturing enabling technology. *Applied Energy*. 2021. Vol. 304. Article ID 117814. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117814>.
15. Jiao X. Y., Wang P. Y., Liu Y. X., Wang J., Liu W. N., Wan A. X., Xiong S. M. Fracture behavior of a high pressure die casting AlSi10MnMg alloy with varied porosity levels. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 25. P. 1129–1140. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.281>.
16. Kang H. J., Jang H. S., Oh S. H., Yoon P. H., Lee G. H., Shin S. M., Choi Y. S. Effects of gate system design on pore defects and mechanical properties of pore-free die-cast Al-Si-Cu alloy. *Materials Today Communications*. 2022. Vol. 31. Article ID 103673. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103673>.
17. Szalva P., Orbulov I. N. The effect of vacuum degree on the porosity and mechanical properties of die cast AlSi9Cu3(Fe) aluminum alloy. 2018. URL: https://real.mtak.hu/89281/1/IJMC-D-18-00211_R2_REAL.pdf?utm_source=chatgpt.com

REFERENCES:

1. Pidgurskyi, M., Pidgurskyi, I., Stashkiv, M., Ihnatieva, V., Danylchynko, S., Bykiv, D., & Pidluzhnyi, O. (2023). Peculiarities of studying the stress-strain state of structural steel perforated beams using the finite element method. *Scientific Journal of TNTU*, 111(3), 126–138. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.126.
2. Niu, Z., Liu, G., Li, T., & Ji, S. (2022). Effect of high pressure die casting on the castability, defects and mechanical properties of aluminium alloys in extra-large thin-wall castings. *Journal of Materials Processing Technology*, 303, art. 117525. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117525>.
3. Nunes, H., Emadinia, O., Vieira, M. F., & Reis A. (2023). Low-and high-pressure casting aluminum alloys: a review. *Recent Advancements in Aluminum Alloys*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109869>.
4. Réger, M., Horváth, R., Fábián, E. R., & Réti, T. (2025). Modelling the impregnation of a pressure-tight casting. *International Journal of Metalcasting*, 19(1), 165–175. <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01272-1>.
5. Li, D., Slater, C., Cai, H., Hou, X., Li, Y., & Wang, Q. (2023). Joining technologies for aluminium castings – a review. *Coatings*, 13(5), art. 958. <https://doi.org/10.3390/coatings13050958>.
6. Gyarmati, G., Kéri, Z., Mende, T., & Molnár, D. (2024). Analysis of the quality of incoming AlSi9Mn alloy ingots. *International Journal of Metalcasting*, 18(2), 1723–1738. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01146-y>.

7. Yang, J., Liu, B., Shu, D., Li, H., Yang, Q., Hu, T., & Tang, X. (2025). Effect of ultra vacuum assisted high pressure die casting on the mechanical properties of Al-Si-Mn-Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 1026, art. 180531. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.180531>.
8. Kan, M., Ipek, O., & Koru, M. (2023). An investigation into the effect of vacuum conditions on the filling analysis of the pressure casting process. *International Journal of Metalcasting*, 17(1), 430–446. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00770-4>.
9. Trometer, N., Godlewski, L. A., Prabhu, E., Schopen, M., & Luo, A. A. (2024). Effect of vacuum on die filling in high pressure die casting: water analog, process simulation and casting validation. *International Journal of Metalcasting*, 18(1), 69–85. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01002-z>.
10. Stalnichenko, O., Lysenko, T., Ponomarenko, O., Kreitser, K., & Kozishkurt, E. (2025). Vacuum technology for magnesium alloys during die casting of radiators. *Advanced Manufacturing Processes VI*. Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_20.
11. Soares, G., Neto, R., Madureira, R., Soares, R., Silva, J., Silva, R. P., & Araújo, L. (2023). Characterization of Al alloys injected through vacuum-assisted HPDC and influence of T6 heat treatment. *Metals*, 13(2), art. 389. <https://doi.org/10.3390/met13020389>.
12. Jiao, X. Y., Zhang, Y. F., Wang, J., Nishat, H., Liu, Y. X., Liu, W. N., & Xiong, S. M. (2021). Characterization of externally solidified crystals in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy and their effect on porosities and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 298, art. 117299. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117299>.
13. Réger, M., Horváth, R., Fábrián, E. R., & Réti, T. (2024). Impregnation problems of aluminum castings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1313(1), art. 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1313/1/012007>.
14. Liu, W., Peng, T., Kishita, Y., Umeda, Y., Tang, R., Tang, W., & Hu, L. (2021). Critical life cycle inventory for aluminum die casting: a lightweight-vehicle manufacturing enabling technology. *Applied Energy*, 304, art. 117814. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117814>.
15. Jiao, X. Y., Wang, P. Y., Liu, Y. X., Wang, J., Liu, W. N., Wan, A. X., & Xiong, S. M. (2023). Fracture behavior of a high pressure die casting AlSi10MnMg alloy with varied porosity levels. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1129–1140. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.281>.
16. Kang, H. J., Jang, H. S., Oh, S. H., Yoon, P. H., Lee, G. H., Shin, S. M., & Choi, Y. S. (2022). Effects of gate system design on pore defects and mechanical properties of pore-free die-cast Al-Si-Cu alloy. *Materials Today Communications*, 31, art. 103673. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103673>.
17. Szalva, P., & Orbulov, I. N. (2018). The effect of vacuum degree on the porosity and mechanical properties of die cast AlSi9Cu3(Fe) aluminum alloy. Retrieved from https://real.mtak.hu/89281/1/IJMC-D-18-00211_R2_REAL.pdf?utm_source=chatgpt.com



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 24.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.01.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 669.162.263:621.1:620.9

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-15>

ОЦІНКА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗАЛЕЖНО ВІД ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

Навольнєв Ігор Юрійович,

аспірант кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0002-0477-7522

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук,

проректор з науково-дослідної роботи, професор кафедри металургії,

кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

Чупринов Євген Валерійович,

кандидат технічних наук,

в.о. проректора з наукової роботи, доцент кафедри металургійних технологій

Державного університету економіки і технологій

ORCID ID: 0000-0001-8605-3434

Ця стаття є продовженням раніше початих досліджень, спрямованих на оцінку продуктивності виробничого процесу окатишів залежно від шихти та використання ПАР. Як і на попередньому етапі, розглядався повний цикл термообробки залізрудних окатишів – від сушіння та підігріву до випалу, рекуперації та охолодження, з придивлянням до впливу використання поверхнево-активних речовин (далі – ПАР) на загальні питомі витрати електроенергії, з виключенням витрат природного газу. Промислові випробування проведено на одному з провідних гірничозбагачувальних комбінатів Кривбасу зважаючи на перехід з базового (власного) концентрату на сировину іншого підприємства регіону, оброблену неіоногенною ПАР. На відміну від попередніх досліджень, які були побудовані на восьмифакторній моделі аналізу, були виключені незначущі показники, тому аналітика теперішніх досліджень будувалася на підставі п'ятифакторної системи аналізу, а також зменшено крок часу між замірами змін, що дає підґрунтя більш точнішим розрахункам. Показано, що ключовими факторами впливу є вологість шихти, витрата вапняку, міцність сирих окатишів, висота шару та тиск газу. При цьому саме збільшення витрати вапняку стало суттєвим фактором впливу на загальне енергоспоживання. Зафіксовано зростання витрат електроенергії на 25,88 %. Результати актуальні для фахівців у галузях енергоменеджменту, електроенергетики та теплотехніки в металургії, зокрема при розробці заходів з оптимізації енерговитрат у промислових умовах.

Ключові слова: залізрудні окатиші, випалювальна машина, поверхнево-активні речовини, шихта, енергоспоживання, природний газ, електроенергія, дисперсність концентрату, вологість, продуктивність, промислові випробування, регресійне моделювання.

Navolniev Igor, Kukhar Volodymyr, Chuprinov Yevgen. Assessment of electricity consumption of an induration machine depending on feed mix properties and the use of surfactants

This article is a continuation of previously initiated research aimed at assessing the performance of the pellet production process depending on the feed mix and the use of surfactants (SAS). As in the previous stage, the full cycle of thermal treatment of iron ore pellets – from drying and preheating to firing, heat recovery, and cooling – was considered, with attention focused on the impact of using surface-active substances (SAS) on total specific electricity consumption, excluding natural gas costs. Industrial trials were conducted at one of the leading mining and processing plants in Kryvyi Rih in connection with the transition from the baseline (in-house) concentrate to raw material from another regional enterprise treated with non-ionic SAS. Unlike previous studies, which were based on an eight-factor analysis model, insignificant indicators were excluded, and the analytics of the current research was thus built on a five-factor analysis system, with the time interval between measurements also reduced, providing a basis for more accurate calculations. It is shown that the key influencing factors are feed mix moisture, limestone consumption, green pellet strength, bed height, and gas pressure. At the same time, the factor of increased limestone consumption became a significant driver of overall energy consumption. A 25.88% increase in electricity costs was recorded. The results are relevant for specialists in energy management, electrical engineering, and thermal engineering in metallurgy, particularly in developing measures to optimize energy costs under industrial conditions.

Key words: iron ore pellets, induration machine, surfactants, feed mix, energy consumption, natural gas, electricity, concentrate fineness, moisture content, productivity, industrial trials, regression modeling.

Вступ. Забезпечення енергоефективності процесів виробництва залізорудних окатишів є одним з актуальних викликів розвитку гірничо-металургійної галузі в умовах глобальних тенденцій на декарбонізацію виробництва та перехід до «зеленої» металургії [1]. Ефективне використання енергоресурсів сприяє поліпшенню економічної стійкості підприємств і зниженню негативного впливу на довкілля шляхом скорочення викидів парникових газів. Наприклад, у роботах [2; 3] зазначено, що виробництво залізорудних окатишів, яке є важливим проміжним продуктом для металургійної переробки, розглядається як один із пріоритетних напрямів для впровадження енергоощадних рішень у сталевиробній промисловості.

Процес отримання окатишів містить процес збагачення руд й отримання концентрату, формування сирих окатишів шляхом огрудкування та їх сушіння [4; 5]. Основними джерелами енергоспоживання є електроенергія для роботи змішувачів, огрудкувачів, тягодуттєвого обладнання, конвеєрів, укладальників та іншого обладнання, а також тепла енергія для видалення вологи під час сушіння. Ураховуючи комплексну складність технологічного обладнання, необхідно забезпечувати пильний контроль його стану для мінімізації виробничих ризиків [6; 7]. Ефективність процесів сушіння сирих окатишів істотно залежить від фізико-хімічних властивостей шихти, зокрема вологості концентрату й сирих окатишів, гранулометричного складу, вмісту в'язучих матеріалів та реологічних характеристик суміші [8–11], які формуються на попередніх стадіях. Однією з таких стадій є подрібнення залізорудної сировини, ефективність якого визначається, зокрема, зносостійкістю тіл для подрібнення; як показано у [12], підвищення їх довговічності сприяє стабілізації гранулометричних і фізико-хімічних параметрів концентрату, що позитивно впливає на подальшу ефективність виробництва окатишів. Реологічні властивості вологого концентрату істотно впливають на формування сирих окатишів, їх густину та міцність, що підтверджується результатами досліджень [13], де встановлено взаємозв'язок між моментом активації поверхні залізорудного концентрату й фізико-механічними характеристиками «сирих» окатишів. Також дослідниками [14] встановлено, що реологічні характеристики залізорудних суспензій залежать від вмісту твердих часток і гранулометричного складу, а додавання дрібних фракцій до грубозернистої пульпи суттєво знижує її в'язкість.

За даними [15], питомі витрати теплової енергії на сушіння мінеральних концентратів

зазвичай становлять 800–1500 ккал на кілограм видаленої води (0,93–1,74 кВт·год/кг), що підкреслює вплив вологості (вогкості) концентрату на енергомісткість процесу. У роботі [16] встановлено, що при сушінні латеритної руди в промислових обертових сушарках з високою початковою вологістю (~27 %) спостерігаються значні теплові втрати через корпус сушарки, які досягають 3,5 % витраченої енергії палива (5,8 ГДж/год), що зумовлюється особливостями теплообміну та характеристиками вихідної сировини. З метою підвищення ефективності сушіння та зниження енерговитрат розробляються нові технології, зокрема мікрохвильове сушіння залізорудних окатишів, яке, за даними [17], забезпечує прискорене видалення вологи завдяки зниженню енергії активації процесу й підвищенню ефективної дифузії вологи порівняно з традиційним конвективним методом [15; 18]. Витрати енергії та теплові втрати в процесах збагачування оптимізують аналогічно до металургійних процесів – шляхом розробки математичних моделей, як це показано в роботі [19] для металургійного обладнання. Температурні режими та енергоспоживання регулюють за допомогою засобів автоматичного керування й систем температурного моніторингу [20].

Вологість шихти та сирих окатишів є одним із головних чинників, що визначає витрати енергії на сушіння [4; 15; 21]: підвищення вологості потребує більше тепла для випаровування та збільшує час сушіння. Це веде до зниження продуктивності обладнання й підвищення частки браку через погіршення міцності сирих окатишів. Гранулометричний склад шихти також суттєво впливає на енергоспоживання [4; 5; 9; 15]: дрібні фракції швидше висушуються, але надлишок дрібних частинок сприяє втратам продукції. Великі окатиші вимагають довшого сушіння, що потребує додаткових витрат енергії та знижує темпи виробництва.

Одним із напрямів удосконалення технології виробництва залізорудних окатишів є впровадження нових типів концентратів, оброблених поверхнево-активними речовинами (далі – ПАР) [11; 21]. Ефекти застосування ПАР є досить суперечливими. З одного боку, застосування ПАР змінює змочуваність і реологічні властивості концентрату, покращуючи його здатність до огрудкування та зменшуючи злежуваність. При цьому, як показано у [22], обробка концентрату аніонними та неіонними ПАР дає змогу додатково знизити вологість концентрату на 2–4 % завдяки зміні поверхневих властивостей частинок. Водночас обробка концентрату ПАР супроводжується підвищенням вологості

шихти та зміною структури поверхні частинок. Дослідниками [23] встановлено, що використання поверхнево-активних флотаційних реагентів (зокрема Atrac) у залізорудному концентраті призводить до підвищення пористості та зниження міцності сирих окатишів, що погіршує їх поведінку під час сушіння й може сприяти зростанню енерговитрат через зниження проникності шару й утворення пилу. Підвищена вологість ускладнює процес сушіння, збільшує питомі витрати енергії та може знижувати продуктивність обпалювальної машини. Крім того, зміни у формуванні шару сирих окатишів на конвеєрних машинах можуть призводити до нестабільності технологічного процесу [4; 15]. Поряд із цим використання ПАР забезпечує покращення дисперсності концентрату та стабілізацію гранулометричного складу сирих окатишів. Також спостерігається потенційне зниження витрати в'язучих речовин, зокрема бентоніту, що позитивно впливає на міцність сирих окатишів [11; 24]. Усі ці зміни потребують комплексного врахування при оцінці впливу ПАР на енергоспоживання та продуктивність виробничого процесу.

Проблема прогнозування енергоспоживання особливо актуальна для гірничозбагачувальних комбінатів, зокрема Кривбасу, на яких здійснюється виробництво залізорудних окатишів для металургійної галузі. На цих підприємствах виникають технологічні труднощі, пов'язані з підвищенням вологості концентрату, необхідністю оптимізації витрати бентоніту для забезпечення якості сирих окатишів та застосуванням ПАР. При плановому переході базового Підприємства «А» на концентрат виробництва Підприємства «Б» відбуваються зміни фізико-хімічних характеристик шихти, що призводять до змін продуктивності технологічного обладнання та витрат електроенергії. З огляду на це, актуальним є завдання встановлення кількісних залежностей між характеристиками сировини та параметрами енергоспоживання і продуктивності. У цій статті умовні назви «Підприємство «А»» та «Підприємство «Б»» використано з міркувань конфіденційності та дотримання принципу комерційної нейтральності, щоб уникнути ненавмисної реклами або антиреклами конкретних виробників.

Мета роботи – встановити кількісні залежності між фізико-хімічними характеристиками шихти (зокрема, вологістю, гранулометричним складом та використанням поверхнево-активних речовин) і питомими витратами електроенергії, а також продуктивністю випалювального агрегата в промислових умовах Підприємства

«А» при переході з базового концентрату на модифікований ПАР концентрат виробництва Підприємства «Б».

Матеріали та методики

1. Технологічні умови, обладнання та організація промислового експерименту.

Перед початком випробувань підготовлено обладнання всього технологічного комплексу: дозатори, млинові тракти, чашові огрудковувачі, роликовий трипродуктовий грохот Metal7 (із просвітами 16,0 мм та 9,0 мм), грохот ГСТ, димососи, а також проведено перевірку й налагодження вагового обладнання.

Експериментальні дослідження проведено на промисловій випалювальній машині Підприємства «А», призначеній для термічної обробки залізорудних окатишів. Установка є безперервною конвеєрною системою з ланцюговим транспортером і візками, які переміщують шар окатишів через зони сушіння, підігріву, випалу, рекуперації та охолодження. Конструкція машини містить інжекційні пальники, газорозподільні камери з газоповітря розподільними пристроями, систему подання рециркульованого теплоносія та автоматизовану систему регулювання температурних режимів. Рекуперація тепла забезпечує підвищену енергоефективність і зниження витрат палива.

Основні технічні характеристики випалювальної машини (Підприємство «А»): Річна продуктивність – 2,4 млн т; поточна – 300 т/год; питома продуктивність – 0,893 т·м²/год; шар сирих окатишів – 300 мм; кількість візків – 142; газоповітряних камер – 28; швидкість руху візків – 0,6–2,5 м/хв; маса візка – 10,3 т; розподіл зон: сушіння, нагрів, випал, рекуперація (макс. зона – рекуперація 37,5 %); максимальна температура випалу – 1350 °С; теплоносії на виході – до 550 °С; питома витрата теплоти – 533,68 МДж/т; природного газу – 17,9 м³/т; електроенергії – 30,7 кВт·год/т; температура окатишів на виході – 100 °С; потужність приводу – 32 кВт; загальна маса – 4600 т. Промислові випробування проводили з огляду на виробничу необхідність повністю перейти з концентрату Підприємства «А» на концентрат, вироблений Підприємством «Б». Обидва концентрати мали високий уміст заліза (понад 67 %), однак концентрат Підприємства «Б» вирізнявся підвищеною дисперсністю (фракція –0,056 мм: 98,0–98,6 %; фракція +0,056 мм (відповідно залишок): 1,4–2,0 %). Під час попередніх випробувань встановлено, що підвищена дисперсність концентрату Підприємства «Б» негативно впливає на огрудковувальність (комкуємість) шихти, що спричиняє збільшення обсягу сирого

повернення та зниження стабільності формування шару окатишів. Для компенсації цієї проблеми застосовували попередню обробку концентрату Підприємства «Б» ПАР Clearon S955 – неіоногенною сполукою на основі етоксильованого ізотридеканола, яка застосовується переважно для покращення фільтрації та зневоднення концентрату після збагачення.

У досліджуваному випадку ПАР також забезпечувала покращену змочуваність й агрегацію частинок концентрату, що сприяло стабілізації процесу огрудкування тонкодисперсного концентрату Підприємства «Б». Водночас зниження природної вологості концентрату після зневоднення вимагало додаткового зволоження в змішувачі та огрудковувачі, що в підсумку призвело до збільшення загальної вологості шихти. Це, своєю чергою, впливає на збільшення енергетичних витрат на сушіння окатишів.

Підготовлено й заскладовано шихтові матеріали (бентоніт, вапняк), організовано транспортування та складування концентрату Підприємства «Б» на склад збагачувальної фабрики Підприємства «А» з дотриманням вимог до чистоти й роздільності партій. Для стабілізації механічних властивостей сирих окатишів скориговано витрату бентоніту в складі в'язучого компонента.

Випробування тривали вісім діб. Упродовж перших двох днів випалювальна машина працювала на базовому концентраті Підприємства «А»

для стабілізації технологічного режиму та фіксації контрольних показників. Починаючи з 21:00 другого дня повністю введено концентрат Підприємства «Б» (оброблений ПАР), який завантажували після спустошення бункерів і використовували до завершення експерименту. Усі ключові технологічні параметри (витрати сировини, газу, електроенергії, температури, характеристика продукції) фіксувалися погодинно, позмінно й усереднено за добу, що забезпечило можливість порівняльного аналізу впливу типу концентрату на ефективність процесу.

2. Методи та засоби вимірювання. Вологість концентрату визначали зважуванням проб до та після сушіння у шафі БСЛ-1.0.3 (прямоток, теплоносій – топкові газу) при 105 ± 5 °C до сталої маси. Гранулометричний склад сирих окатишів визначали ситовим методом (згідно з ДСТУ 3210-95 / ISO 4701:2017) з використанням віброгрохота 8ГВ-3Я з тривалим віброзбуджувачем (діапазон 5–20 мм). Міцність на стиск сирих окатишів визначалася методом відповідно до ДСТУ 3212-95 (аналогічно ISO 4700:2015), шляхом застосування стискаючої сили до окремих окатишів до руйнування. Міцність на скидання оцінювалася відповідно до ДСТУ 3213-95 (аналогічно ISO 3271:2015) шляхом скидання окатишів з висоти 0,5 м на сталеву пластину та підрахунку кількості скидів до руйнування. Гранулометричний склад для класу 10–14 мм (X8) оцінювався в сирих окатишах методом ситового

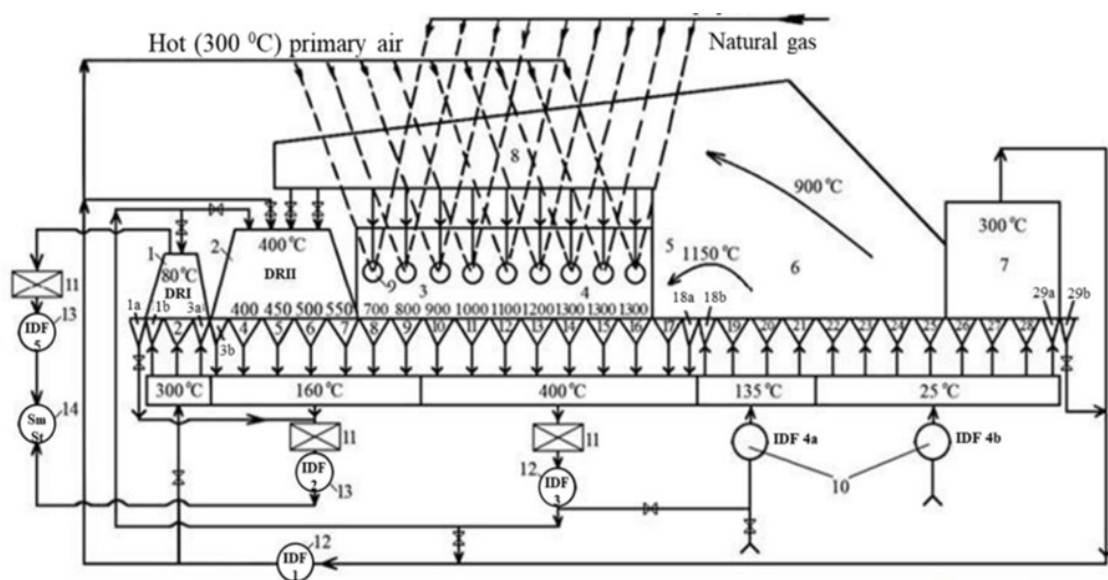


Рис. 1. Теплова схема опалювальної машини (Підприємство А):

1 та 2 – сушіння I та II; 3 – нагрівання; 4 – опалювання; 5 – рекуперація тепла; 6 та 7 – охолодження I та II; 8 – поперечний колектор; 9 – інжекційні пальники; 10 – повітряні вентилятори; 11 – сухі пилотовловлювачі; 12 – високотемпературні рекуперативні витяжні вентилятори; 13 – витяжні вентилятори, що викидають газу в димар; 14 – димова труба

аналізу (ДСТУ 3210-95 / ISO 4701:2017), що відображає ефективність процесу грануляції та стабільність формування окатишів. Продуктивність фіксували стрічковими вагами Schenck MULTIDOS (похибка 0,1–1,0 %, до 1000 т/год, швидкість ленти – до 0,2 м/с). Облік витрат електроенергії визначали за промисловими електролічильниками НІК 2303 АРЗ (клас точності 1.0). Питомі витрати розраховували з урахуванням змінного випуску продукції на основі хронометрування та добового обліку.

3. Визначення факторів, що впливають на результат. При проведенні дослідно-промислових випробувань здійснювали щогодинний контроль таких технологічних параметрів: продуктивності машини (т/год), швидкості руху візків (м/хв), температури в зоні сушіння (°C), розрідження (даПа), кількості сирих окатишів на грохоті (т/год), витрати бентоніту (кг/т), витрати обпаленого повернення (т/год), вологості сирих окатишів (%), питомої витрати електроенергії (кВт·год/т) та ін. Дані систематизували в таблицях щоденного обліку (з розрахунком усереднених значень за добу), для встановлення змін у роботі обладнання при переході від використання базової сировини до концентрату Підприємства «Б», модифікованого ПАР. Провели класифікацію факторів (див. табл. 1), що впливають на результат у вигляді продуктивності машини, витрат електричної енергії.

Цільовою функцією стало енергоспоживання (Y_1 – питома електроенергія), оскільки основною метою було оцінити енергетичні наслідки на стадії сушіння. Вплив на якість обпалених окатишів (наприклад, міцність) не оцінювався в цьому дослідженні, оскільки попередні перевірки підтвердили відповідність стандартам, а фокус був на ефективності процесу, а не на кінцевому продукті металургії. Майбутні роботи

можуть розширитися на властивості обпалених окатишів.

Для зменшення кількості факторів впливу застосовували метод експертних оцінок, що дало змогу скоротити їх кількість до 5 (у випадку віднесення продуктивності до фактору впливу, кількість факторів збільшується до 6). Логіка скорочення кількості факторів полягала, зокрема, у нівелюванні впливом технологічних факторів, значення яких не отримали відчутних змін при переході з однієї сировини на іншу, тобто, за інших рівних умов, їх вплив є рівнозначним.

У процесі отримання рівнянь регресії за методикою Data Analysis додатково перевіряється вплив кожного з обраних факторів, що дає змогу з'ясувати нівелювання впливу деяких факторів на результат із відповідним додатковим скороченням складників математичної моделі.

Результати. У процесі промислових випробувань зібрано та систематизовано подрібнені подобові значення технологічних параметрів, що охоплюють два періоди: використання базового концентрату Підприємства «А» (дні 1–2) та перехід на концентрат Підприємства «Б» з обробкою ПАР (дні 3–8).

У табл. 2 та табл. 3 наведено значення ключових факторів впливу ($X_1 \dots X_5$) та результати для показника (Y_1), включно з добовими значеннями, повним діапазоном коливань кожного з параметрів (min...max), а також зведеними середніми по кожному з етапів.

Третій день представляв перехідний період адаптації під час заміни концентрату, з екстремальними значеннями для обраних факторів через коригування режиму.

При цьому зростання пікове споживання електроенергії з 31,8 кВт·год/т на початку

Таблиця 1

Класифікація факторів впливу

Обладнання (Machine)	Матеріали (Material)	Методи (Method)	Вимірювання (Measurement)
Випалювальна машина, інжекційні пальники, ГПП, грохот Metal7, грохот ГСТ, димососи, шафа БСЛ-1.0.3, віброгрохот 8ГВ-3Я	Бентоніт (витрата, фракція, вологість, набухання), вапняк, обпалене повернення, вологість концентрату та сирих окатишів, фракція –0,056 мм, вміст Fe, SiO ₂ , CaO + MgO, ПАР Clearon S955	Порядок подання концентратів, дозування, стабілізація параметрів, використання тимчасової карти режимів	Визначення вологості (шафа), ситовий аналіз (сита Ø200 мм), стрічкові ваги Schenck, електролічильники НІК 2303 АРЗ
Людський фактор (Man)	Управління (Management)	Обслуговування (Maintenance)	Середовище (Mother Nature)
Персонал, ознайомлений з методикою; ручне та/або автоматизоване керування режимами; хронометрування	Організація транспортування, складування, розробка карт, перевірка дозаторів і бункерів	Профілактика, налаштування вузлів і приладів, техобслуговування	Температура в зоні сушіння, розрідження в горні та камерах, тиск у ГПК, вологість середовища

експерименту до 40,03 кВт·год/т прийшлося на третю добу в момент переходу на п'яту добу експерименту. Це відбулося тому, що на п'ятий день припав так званий пік шоку, а саме складання таких параметрів: пікове накопичення вологи, найнижча газопроникність шару зумовлена, зокрема, зростанням використання вапняку, ручна адаптація теплових режимів, що призвела до подовження циклів сушіння та максимального навантаження на тягодуттєве обладнання. Надалі (6–8 дні) споживання стабілізувалося на рівні ~40,0 кВт·год/т завдяки оптимізації параметрів.

Дані отримані вимірюванням протягом 2 днів роботи з концентратом Підприємства «А» та 8 днів роботи з концентратом Підприємства

«Б» в загальному обсязі 64 в межах діапазону в табл. 2 та структуруються відповідно до формул регресійного аналізу, що покладені в основу математичних моделей залежності вихідних параметрів від ключових факторів впливу. Зміна сировини супроводжувалась варіаціями у витратах основних компонентів шихти, фізико-хімічних властивостях концентрату, параметрах формування сирих окатишів та ефективності процесу випалювання.

Після математичної обробки результатів, отримали коефіцієнти рівняння регресії та відповідний коефіцієнт детермінації R^2 , див. табл. 4.

При попередньому аналізі даних на виявлення кореляції між факторами та оцінці

Таблиця 2

Вхідні параметри та структура регресійної моделі

Вигляд рівняння регресії	Назва фактору (X) або (Y)	Одиниці вимірювання	Позначення фактору	Діапазон (min...max)
$Y_1 = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5$	Витрати вапняку	кг/т	X_1	5,3...8,97
	Вміст вологи у сирому окатиші	%	X_2	8,3...9,6
	Міцність на роздавлювання	кг/окатиш	X_3	1,18...1,56
	Висота шару сирих окатишів	мм	X_4	304...359
	Тиск у вакуумній камері	даПа	X_5	256...491
	Питома витрата електроенергії	кВт/т·год	Y_1	31,8...40,03

Таблиця 3

Подобові експериментальні дані факторів $X_1 - X_5$ та питомої витрати електроенергії Y_1 під час переходу від концентрату Підприємства «А» до концентрату Підприємства «Б», обробленого ПАР

Доба	X_1 , Витрата вапняку, кг/т	X_2 , Волога, %	X_3 , Міцність на роздавлювання	X_4 , Висота шару, мм	X_5 , Тиск вак. кам, даПа	Y_1 , ел. ен., кВт/год
	1	2	3	4	5	6
1 (початок експерименту)	5,3	8,4	1,42	356	482	31,8
2 (за 8 годин до зміни сировини)	5,3	8,4	1,48	357	470	33,3
3 (зміна сировини)	8,96	8,8	1,27	337	286	37,15
3 (8 годин після заміни сировини)	8,96	8,9	1,34	335	278	36,78
4 (8 годин до піку «шоку»)	8,95	8,8	1,31	304	256	38,72
5 (пік «шоку»)	8,97	8,9	1,32	326	280	40,03
5 (8 годин після піку «шоку»)	8,95	9,6	1,37	325	269	37,61
8 (8 годин до закінчення експерименту)	8,95	8,9	1,29	336	290	38,44
8 (закінчення експерименту)	8,95	8,8	1,38	334	272	37,61

Таблиця 4

Коефіцієнти до рівнянь регресії для прогнозування витрат електроенергії

Y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	R^2
Y_1	35,23	2,84	-1,13	5,55	-0,098	0,042	0,7686

значущості отриманих коефіцієнтів регресії виявлено складний характер взаємного зв'язку низки факторів із великим внеском в результативну величину Y_1 . Для регресійної моделі запропоновано вилучити фактори, які враховували в попередніх розрахунках, а саме: «витрати бентоніту», «витрати обпаленого повернення», «вміст Fe», «міцність на роздавлювання», «міцність на скидання», «частка 10–14», як визначено як незначущі. Це дало змогу отримати адекватну модель Y_1 з наявністю тільки значущих коефіцієнтів з рівнем значущості $\alpha = 0,05$ як залежна від X_1, X_2, X_3, X_4 та X_5 з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,77$ (що є незначною мірою менше за $R^2 = 0,82$ для попередньої моделі з наявністю комплексного впливу більшої кількості врахованих факторів). Це вказує на те, що фактори «витрати бентоніту», «витрати обпаленого повернення», «вміст Fe», «частка 10–14» та «міцність на скидання» не зробили суттєвого внеску в пояснення варіацій у споживанні енергоносіїв у досліджуваних умовах. Імовірно, у межах експерименту ці параметри залишалися відносно стабільними або їх вплив був слабшим порівняно з основними факторами – витратами вапняку, вологістю, міцністю та тиском у вакуумній камері. Нульовий коефіцієнт не означає відсутності фізичного впливу, а лише відображає домінування сильніших факторів у цьому плані експерименту. Це типовий результат багатфакторного аналізу, коли взаємозв'язки між змінними маскують вплив менш значущих параметрів.

Дискусія. У процесі промислових випробувань встановлено, що концентрат Підприємства «Б» характеризується вищим умістом дрібнодисперсної фракції ($-0,056$ мм) порівняно з базовим концентратом Підприємства «А». Така зміна гранулометричного складу призвела до зниження природної огрудкованості шихти, ускладнивши формування стабільних сирих окатишів. З метою компенсації гірших грануляційних властивостей застосовано ПАР у поєднанні із цілеспрямованим додатковим

зволоженням концентрату. При цьому, зростання витрат вапняку (з $5,3$ до $8,97$ кг/т) зумовлене необхідністю посилити зв'язувальні властивості шихти через нижчу природну огрудкованість концентрату Підприємства «Б», викликану його вищою дисперсністю та гіршою агрегацією частинок. У результаті таких заходів середній уміст вологи в сирих окатишах збільшилося – з $8,3$ % до $9,6$ %. Це свідчить як про підвищену гідрофільність обробленого концентрату, так і про технологічну необхідність забезпечення стабільного процесу огрудкування шляхом зволоження. Водночас підвищення вологовмісту суттєво ускладнило подальшу стадію обпалювання.

Після переходу на концентрат Підприємства «Б» зафіксовано зростання використання електроенергії від $31,8$ до $37,15$ кВт·год/т (середнє $34,4$ кВт·год/т, зростання на $5,25$ кВт·год/т, або $16,28$ %). Найвищий показник споживання електроенергії припав на 5 добу експерименту припав на п'яту добу експерименту ($40,03$ кВт·год/т, середнє $35,9$ кВт·год/т, зростання на $8,23$ кВт·год/т, або $25,88$ %). Саме на цей період прийшовся так званий пік шоку, коли здійснювалися компенсаційні дії. Надалі витрати стабілізувалися, однак залишалися вищими за базові. Крім того, зміна реологічних властивостей суміші та зниження початкової механічної міцності окатишів вимагали застосування більш обережних температурних режимів із подовженими циклами нагріву. Дисперсні властивості концентрату Підприємства «Б», що відрізняються від базового матеріалу, зумовили необхідність його модифікації з використанням ПАР. Узагальнені причинно-наслідкові зв'язки впливу такого втручання на процес огрудкування та енерговитрати наведено на схемі рис. 2 («Проблема – Дії – Результат»).

Результати проведеного аналізу узагальнено в табл. 5.

Додатковим чинником зростання енерговитрат могла стати тимчасова нестабільність теплових режимів. У цей час оператори могли



Рис. 2. Схема «Проблема – Дія – Результат»

Таблиця 5

Аналіз результатів промислового експерименту з отримання залізорудних окатишів при переході з концентрату Підприємства «А» на концентрат Підприємства «Б», оброблений ПАР

Параметр	Базовий концентрат (Виробник «А»)	Концентрат + ПАР (Виробник «Б»)	Δ (абс.)	Δ (%)
Споживання вапняку, кг/т	5,3	8,96	↑ 3,66	↑ 69,06
Вологість сирого окатиша, %	8,375	8,875	↑ 0,5	↑ 5,97
Міцність на стиск, кг/окатиш	1,46	1,32	↓ -0,14	↓ -10,1
Висота шару, мм	357	333	↓ 24	↓ 6,72
Тиск, дПа	477,81	281,77	↓ 196,04	↓ 41,03
Питоме споживання електроенергії, кВт/г	31,8	40,03	↑ 8,23	↑ 25,88

застосовувати знижені температури чи швидкість подання газу для запобігання руйнуванню окатишів, що, у поєднанні зі зниженням продуктивності, призвело до зростання питомих витрат енергії через сталі фонові теплові втрати агрегату.

Так, застосування ПАР у складі технології обробки концентрату Підприємства «Б» сприяло покращенню змочуваності та агрегації частинок, однак водночас зумовило підвищення вологості суміші, погіршення умов сушіння та зростання витрат енергоносіїв у перехідному періоді.

У межах проведених випробувань виокремити вклад ПАР у зміну технологічних показників складно, оскільки перехід на новий концентрат супроводжувався одночасною зміною фізико-хімічних і технологічних параметрів. Додатковим обмеженням є відсутність лабораторних даних щодо гідрофільності концентратів, що ускладнює кількісну інтерпретацію ефекту змочування. Перспективним напрямом подальших досліджень є проведення спеціалізованих тестів із контрольованим дозуванням ПАР, а також випробувань концентратів із варіативною вологістю для точнішого визначення ролі зволоження у формуванні енерговитрат.

Висновки. Проведено промислові випробування на Підприємства «А» з переходом від власного концентрату до концентрату Підприємства «Б», обробленого ПАР. Експерименти містили два етапи: дні 1–2 – базовий концентрат Підприємства А, дні 3–8 – концентрат Підприємства Б з ПАР. Порівняно з базовим періодом, нова сировина викликала зміну фізико-хімічних властивостей шихти, що вплинуло на стабільність формування й сушіння окатишів. Отримані результати відображають загальний вплив модифікації концентрату на тепловий режим й енергоспоживання повного циклу роботи випалювального агрегату, включно із сушінням, випалом, рекуперацією та охолодженням.

Отримано узагальнені залежності між характеристиками сировини та технологічними показниками. Для їх кількісного опису застосовано регресійний аналіз. Побудовані моделі дали змогу прогнозувати питомі витрати енергоносіїв і продуктивність випалювальної машини. Водночас з'ясовано, що такі фактори, як вологість окатишів, витрата вапняку, міцність сирих окатишів, висота шару та тиск газу, впливають на питоме споживання електроенергії.

Установлено, що використання концентрату Підприємства «Б» з ПАР вимагало збільшення використання в процесі обпалу вапняку (з 5,3 кг/т до 8,96 кг/т, тобто на +69,06 %), що зумовлено необхідністю компенсувати підвищену вологість концентрату, модифікованого ПАР (з підвищеною гідрофільністю). Це призвело до зростання питомої витрати електроенергії з 31,8 до 40,03 кВт·год/т (на 8,23 / +25,88 %). Також виявлено підвищення вологості сирих окатишів з 8,375 до 8,875 (на +5,97 %), а також зменшення міцності на стиск з 1,46 до 1,32 кг/ок (на – 10,1 %). Отримані результати свідчать про зростання енерговитрат та зниження ефективності процесу при використанні концентрату Підприємства «Б», що пояснюється його підвищеною дисперсністю та необхідністю зволоження, що призводить до ускладнення процесів сушіння й обпалу та впливає на стабільність теплового режиму.

Загалом, результати дослідження вказують на необхідність індивідуального налаштування режимів сушіння при переході на нові типи концентратів. У подальших дослідженнях доцільно проводити лабораторні випробування з варіюванням вмісту ПАР та вологості для точнішої оцінки їх впливу на енерговитрати та якість продукції. Окрему увагу слід приділити стабілізації теплових режимів у перехідні періоди, що може суттєво покращити енергоефективність виробництва.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Hirlekar O., Kolte A., Vasa L. Transition in the mining industry with green energy: Economic dynamics in mining demand. *Resources Policy*. 2025. Vol. 100. Article 105409. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105409>
2. Hooey L., Riesbeck J., Wikström J.-O., Björkman B. Role of ferrous raw materials in the energy efficiency of integrated steelmaking. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54, No. 3. P. 596–604. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.596>
3. He K., Wang L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 70. P. 1022–1039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007>
4. Moraes S. L. de, Lima J. R. B. de, Ribeiro T. R. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. In: Shatokha V. (ed.) *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. London: IntechOpen, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>
5. Miranda T., Montero I., Sepúlveda F. J., Arranz J. I., Rojas C. V., Nogales S. A review of pellets from different sources. *Materials*. 2015. Vol. 8, No. 4. P. 1413–1427. <https://doi.org/10.3390/ma8041413>
6. Kruzhilko O., Maystrenko V., Tkalych I., Polukarov Yu., Kalinchyk V. P., Neklonskyi I., Ryzhchenko O. Study of the harmful factors influence on the occupational risk level: The example of the Ukrainian mining industry. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2022. Vol. 110, No. 1. P. 35–41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.7029>
7. Kruzhilko O., Volodchenkova N., Maystrenko V., Bolibrukh B., Kalinchyk V. P., Zakora A., Feshchenko A., Yeremenko S. Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprises. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2021. Vol. 108, No. 1. P. 35–41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.4797>
8. Azimova L., Mirbabayeva N. Method for reducing fuel consumption when roasting pellets from magnetite iron ore concentrate. *Engineering Headway*. 2024. Vol. 7. P. 45–50. <https://doi.org/10.4028/p-hG5G1U>
9. Iljana M., Paananen T., Mattila O., Kondrakov M., Fabritius T. Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties. *Metals*. 2022. Vol. 12, No. 2. P. 302. <https://doi.org/10.3390/met12020302>
10. Savchenko I., Shapoval O., Bakharev V., Chupilko T., Babaryka M., Dzyna N. Mathematical model of rheological processes of composite materials deformation. In: *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. pp. 01–06. <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005658>
11. Eisele T. C., Kawatra S. K. A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2010. Vol. 24, No. 1. P. 1–90. <https://doi.org/10.1080/08827500306896>
12. Koval A. D., Efremenko V. G., Brykov M. N., Andrushchenko M. I., Kulikovskii R. A., Efremenko A. V. Principles of development of grinding media with increased wear resistance. Part 2. Optimization of steel composition to suit conditions of operation of grinding media. *Journal of Friction and Wear*. 2012. Vol. 33, No. 2. P. 153–159. <https://doi.org/10.3103/S1068366612020079>
13. Kumeda K., Nakamura H., Ohsaki S., Watano S., Fujiwara S., Iwami Y., Murao A. Relationship between the agitation torque of the wet iron ore powder and pellet properties. *ISIJ International*. 2025. Vol. 65, No. 1. P. 62–69. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-281>
14. Kumar S., Singh M., Singh J., et al. Rheological characteristics of uni/bi-variant particulate iron ore slurry: Artificial neural network approach. *Journal of Mining Science*. 2019. Vol. 55, No. 2. P. 201–212. <https://doi.org/10.1134/S1062739119025468>
15. Mujumdar A. S. Drying in mineral processing. In: Mujumdar A. S. (ed.) *Handbook of Industrial Drying*. 2nd ed. Vol. 2. New York : Marcel Dekker, 1995. P. 921–929.
16. Sheehan M. E. A systems and resistance analysis of heat loss through an industrial flighted rotary ore dryer. In: *Proc. 13th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-13)*. Kyoto, 2006. P. 9. <https://doi.org/10.1615/IHTC13.p24.110>
17. Athayde M., Cota M., Covcevich M. Iron ore pellet drying assisted by microwave: A kinetic evaluation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. Vol. 39, No. 4. P. 266–275. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1423295>
18. Souza A. S. E., de Souza Pinto T. C., Sarkis A. M., de Pádua T. F., Béttega R. Energy analysis of the convective drying of iron ore fines. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2023. Vol. 29, No. 3. P. 189–200. <https://doi.org/10.2298/CICEQ220208026S>
19. Kukhar V., Balalayeva E., Hurkovska S., Sahirov Y., Markov O., Prysiashnyi A., Anishchenko O. The selection of options for closed-die forging of complex parts using computer simulation by the criteria of material savings and minimum forging force. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 989. P. 325–331.

20. Khrebtova O., Shapoval O., Markov O., Kukhar V., Hrudkina N., Rudych M. Control systems for the temperature field during drawing, taking into account the dynamic modes of the technological installation. In: *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005724>
21. Souza Pinto T. C., Souza A. S., Batista J. N. M., Sarkis A. M., Leal Filho L. S., Pádúa T. F. Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*. 2020. Vol. 39, No. 10. P. 1359–1370. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>
22. Patra A. S., Makhija D., Mukherjee A. K., Tiwari R., Sahoo C. R., Mohanty B. D. Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants. *Powder Technology*. 2016. Vol. 287. P. 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.030>
23. Forsmo S. P. E., Forsmo S.-E., Björkman B. M. T., Samskog P.-O. Studies on the influence of a flotation collector reagent on iron ore green pellet properties. *Powder Technology*. 2008. Vol. 182, No. 3. P. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.07.015>
24. Kawatra S. K., Claremboux V. Iron ore pelletization: Part I. Fundamentals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021. Vol. 43, No. 4. P. 529–544. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1897586>

REFERENCES:

1. Hirlekar, O., Kolte, A., & Vasa, L. (2025). Transition in the mining industry with green energy: Economic dynamics in mining demand. *Resources Policy*, 100, 105409. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105409>
2. Hooey, L., Riesbeck, J., Wikström, J.-O., & Björkman, B. (2014). Role of ferrous raw materials in the energy efficiency of integrated steelmaking. *ISIJ International*, 54(3), 596–604. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.596>
3. He, K., & Wang, L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1022–1039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007>
4. Moraes, S. L. de, Lima, J. R. B. de, & Ribeiro, T. R. (2018). Iron ore pelletizing process: An overview. In V. Shatokha (Ed.). *Iron ores and iron oxide materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>
5. Miranda, T., Montero, I., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., & Nogales, S. (2015). A review of pellets from different sources. *Materials*, 8(4), 1413–1427. <https://doi.org/10.3390/ma8041413>
6. Kruzhilko, O., Maystrenko, V., Tkalych, I., Polukarov, Y., Kalinchyk, V. P., Neklonskyi, I., & Ryzhchenko, O. (2022). Study of the harmful factors influence on the occupational risk level: The example of the Ukrainian mining industry. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 110(1), 35–41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.7029>
7. Kruzhilko, O., Volodchenkova, N., Maystrenko, V., Bolibrukh, B., Kalinchyk, V. P., Zakora, A., Feshchenko, A., & Yeremenko, S. (2021). Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprises. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 108(1), 35–41. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.4797>
8. Azimova, L., & Mirbabayeva, N. (2024). Method for reducing fuel consumption when roasting pellets from magnetite iron ore concentrate. *Engineering Headway*, 7, 45–50. <https://doi.org/10.4028/p-hG5G1U>
9. Iljana, M., Paananen, T., Mattila, O., Kondrakov, M., & Fabritius, T. (2022). Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties. *Metals*, 12(2), Article 302. <https://doi.org/10.3390/met12020302>
10. Savchenko, I., Shapoval, O., Bakharev, V., Chupilko, T., Babaryka, M., & Dzyna, N. (2022). Mathematical model of rheological processes of composite materials deformation. In *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005658>
11. Eisele, T. C., & Kawatra, S. K. (2010). A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 24(1), 1–90. <https://doi.org/10.1080/08827500306896>
12. Koval, A. D., Efremenko, V. G., Brykov, M. N., Andrushchenko, M. I., Kulikovskii, R. A., & Efremenko, A. V. (2012). Principles of development of grinding media with increased wear resistance. Part 2: Optimization of steel composition to suit conditions of operation of grinding media. *Journal of Friction and Wear*, 33(2), 153–159. <https://doi.org/10.3103/S1068366612020079>
13. Kumeda, K., Nakamura, H., Ohsaki, S., Watano, S., Fujiwara, S., Iwami, Y., & Murao, A. (2025). Relationship between the agitation torque of the wet iron ore powder and pellet properties. *ISIJ International*, 65(1), 62–69. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-281>
14. Kumar, S., Singh, M., Singh, J., et al. (2019). Rheological characteristics of uni/bi-variant particulate iron ore slurry: Artificial neural network approach. *Journal of Mining Science*, 55(2), 201–212. <https://doi.org/10.1134/S1062739119025468>

15. Mujumdar, A. S. (1995). Drying in mineral processing. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of industrial drying* (2nd ed., Vol. 2, pp. 921–929). Marcel Dekker.
16. Sheehan, M. E. (2006). A systems and resistance analysis of heat loss through an industrial flighted rotary ore dryer. In *13th International Heat Transfer Conference (IHTC-13)* (p. 9). <https://doi.org/10.1615/IHTC13.p24.110>
17. Athayde, M., Cota, M., & Covcevich, M. (2018). Iron ore pellet drying assisted by microwave: A kinetic evaluation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 39(4), 266–275. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1423295>
18. Souza, A. S. E., de Souza Pinto, T. C., Sarkis, A. M., de Pádua, T. F., & Béttega, R. (2023). Energy analysis of the convective drying of iron ore fines. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 29(3), 189–200. <https://doi.org/10.2298/CICEQ220208026S>
19. Kukhar, V., Balalayeva, E., Hurkovska, S., Sahirov, Y., Markov, O., Prisyazhnyi, A., & Anishchenko, O. (2019). The selection of options for closed-die forging of complex parts using computer simulation by the criteria of material savings and minimum forging force. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 989, 325–331.
20. Khrebtova, O., Shapoval, O., Markov, O., Kukhar, V., Hrudkina, N., & Rudych, M. (2022). Control systems for the temperature field during drawing, taking into account the dynamic modes of the technological installation. In *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005724>
21. Souza Pinto, T. C., Souza, A. S., Batista, J. N. M., Sarkis, A. M., Leal Filho, L. S., & Pádua, T. F. (2020). Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*, 39(10), 1359–1370. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>
22. Patra, A. S., Makhija, D., Mukherjee, A. K., Tiwari, R., Sahoo, C. R., & Mohanty, B. D. (2016). Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants. *Powder Technology*, 287, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.030>
23. Forsmo, S. P. E., Forsmo, S.-E., Björkman, B. M. T., & Samskog, P.-O. (2008). Studies on the influence of a flotation collector reagent on iron ore green pellet properties. *Powder Technology*, 182(3), 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.07.015>
24. Kawatra, S. K., & Claremboux, V. (2021). Iron ore pelletization: Part I. Fundamentals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(4), 529–544. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1897586>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 11.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.75.04

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.32782/3041-2080/2026-6-16](https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-16)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО СТАНУ РОЗПЛАВЛЕНИХ ЕЛЕКТРОДНИХ БРИЗОК ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВІДКРИТОЮ ДУГОЮ

Кассов Валерій Дмитрович,

доктор технічних наук, професор,
декан факультету машинобудування
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0000-0003-3034-7470

Малигіна Світлана Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних інформаційних технологій
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0000-0002-2622-5473

Бережна Олена Валеріївна,

доктор технічних наук, професор,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0000-0001-6205-1987

Турчанін Дмитро Михайлович,

аспірант кафедри підйомно-транспортних і металургійних машин
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0009-0008-1792-1574

Бережний Максим Олександрович,

аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0009-0003-2611-2684
Scopus ID: 59169502800

Грушко Єгор Олександрович,

аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0009-0000-2906-8031

У сучасних умовах перед підприємствами та організаціями, що займаються завданнями зварювального виробництва, постає проблема підвищення продуктивності технологічного процесу, підвищення якості продукції, яка випускається, розробки енергоощадних процесів та випуску конкурентоспроможних виробів. Одним зі способів вирішення цієї проблеми є зниження трудомісткості технологічних процесів з використанням відомих видів зварювання. Основну частку металоконструкцій виготовляють за допомогою напів-автоматичного та автоматичного зварювання, ручного дугового зварювання й зварювання порошковим дротом. Проте всі ці види зварювання разом з відомими перевагами мають суттєвий недолік: набризкування розплавлених електродних крапель як фактор, що підвищує трудомісткість виробництва зварних металоконструкцій та погіршує товарний вигляд виробів. На зачистку від бризок одного погонного метра шва, виконаного ручним дуговим зварюванням, припадає 20–25 % трудомісткості всього процесу, а при автоматичному та напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі – 30–40 %. Найбільш простим способом, який дає змогу зменшити ймовірність налипання бризок та полегшити їх видалення з поверхні зварюваного металу, є попереднє нанесення на неї захисних покриттів. Представлена математична

модель теплового стану електродних бризок розплавленого металу після викидання з дугового проміжку при зварюванні відкритою дає змогу оцінити ступінь охолодження краплі розплавленого металу в інтервалі температур навколишнього середовища. Проведено розрахунок температурного поля електродної бризки в різних її точках: у центрі ядра, на поверхні бризок та між ними залежно від часу руху краплі розплавленого електродного металу до контакту зі зварюваною поверхнею. Одержані за запропонованою математичною моделлю результати враховують питому поверхню бризки, її масу, теплофізичні властивості, відстань до поверхні ураження.

Ключові слова: математична модель, захисне покриття, електродні бризки, температурне поле.

Kassov Valeriy, Malyhina Svetlana, Berezshna Olena, Turchanin Dmytro, Bereznyi Maksym, Grushko Egor. Mathematical model of the thermal state of melted electrode spatters in open arc welding

In today's environment, companies and organizations involved in welding production face the challenge of increasing process productivity, improving product quality, developing energy-saving processes, and producing competitive products. One solution to this problem is to reduce the labor intensity of processes using established welding methods. The majority of metal structures are manufactured using semiautomatic and automatic welding, manual arc welding, and flux-cored wire welding. However, all these welding methods, despite their well-known advantages, have a significant drawback: spattering of molten electrode droplets, which increases the labor intensity of welded metal structures and degrades the product's marketability. Cleaning spatter from one linear meter of a weld made using manual arc welding accounts for 20–25% of the labor intensity of the entire process, while for automatic and semiautomatic CO₂ welding, it accounts for 30–40%. The simplest way to reduce the likelihood of spatter adhesion and facilitate its removal from the surface of the weld metal is to pre-apply protective coatings. The presented mathematical model of the thermal state of electrode spatter after ejection from the arc gap during open-arc welding allows one to estimate the degree of cooling of the molten metal droplet within the ambient temperature range. The temperature field of the electrode spatter was calculated at various points: at the center of the core, on the surface of the spatter, and between them, depending on the time the droplet of molten electrode metal travels before contacting the weld surface. The results obtained using the proposed mathematical model take into account the specific surface area of the spatter, its mass, its thermophysical properties, and the distance to the affected surface.

Key words: mathematical model, protective coating, electrode spatter, temperature field.

Вступ. При зварюванні металоконструкцій одна з найбільш трудомістких операцій – очищення деталей від бризок, які міцно зчіплюються з поверхнею основного металу. Рациональний спосіб попередження їх налипання – нанесення спеціальних захисних покриттів. Найбільш поширеними, дешевими та простими у виробництві є захисні покриття на основі водного розчину (як розчинника) [1–2]. Проте досвід використання їх у виробничих умовах виявив істотні недоліки: тривалий час сушіння (1,5–2 г); погана змочуваність забруднених та незнежирених поверхонь; відсутність захисного ефекту при багатопрохідному зварюванні, а також при зварюванні на струмах понад 250А (особливо в умовах крупнокапельного перенесення) через пробій захисного покриття, що призводить до оголення ділянок металу, які захищають; під дією водного розчину деталі піддаються корозії, що веде в разі потрапляння захисного покриття в зону зварювання до виникнення дефектів у зварному шві, поверхня якого в такому разі темнішає [3–6]. Крім того, вони мають низькі зварювально-технологічні характеристики, і при зварюванні відповідальних металоконструкцій їх використання неприпустиме.

При використанні захисних покриттів на основі рідкого скла час сушіння скорочується до 30 хвилин з утворенням щільної захисної плівки.

Проте при їх потраплянні в шов утворюються дефекти. З огляду на високу в'язкість композиції, процес нанесення захисного покриття не може бути механізований. Перед виконанням лакофарбових операцій через високу адгезію до металу, яка ще посилюється при термічному впливі зварювальної дуги, ці покриття видаляються із захищуваних поверхонь за допомогою дробоструминної обробки. Покращення технологічних характеристик цих покриттів базується на ускладненні складу та технології виробництва. Проте і в такому разі не вирішується питання механізації їх нанесення [6; 7].

Захисні покриття на основі лаків та інших органічних речовин висихають протягом 15–30 хвилин, мають високу термостійкість, не впливають на якість зварного з'єднання. Проте такі захисні покриття мають високу вартість, а їх видалення перед проведенням лакофарбових робіт нерідко також можливе лише за допомогою дробоструминної обробки [8–10].

Для створення високоефективного захисного покриття, яке не має вказаних недоліків, необхідний системний підхід до проблеми запобігання приварюванню бризок до поверхні виробу. Зокрема, необхідно оцінити теплове навантаження від крапель розплавленого електродного металу залежно від їх розмірів, швидкості польоту при викиданні з дугового проміжку та відстані до поверхні ураження.

Методи та методики дослідження. При розробці моделі необхідно враховувати температуру та розмір бризок, їх теплофізичні властивості, відстань до поверхні ураження. Щодо цього доцільно представити математичні залежності, що пов'язують ці змінні.

Швидкість польоту бризки та температура поверхні зварюваної деталі дають підставу вважати, що:

$Q_d \gg Q_m$ де Q_d – тепло, одержане часткою в дуговому проміжку, Дж;

Q_m – тепло, одержане часткою від розігрітої поверхні металу, Дж.

Постановка завдання матиме такий вигляд. Дано сферичне тіло (бризка електродного металу) радіусом R з розподілом температури у вигляді функції $f(r)$. Бризка до її контакту з основним металом пролітає середовище з температурою, меншою температури в дуговому проміжку. Загальне формулювання задачі: знайти розподіл температури всередині бризки в будь-який момент часу за умови, що температура T в будь-якій точці бризки є функція часу τ та радіусу r . Диференціальне рівняння теплопровідності для такого сферичного тіла при симетричній задачі (тобто рівномірному охолодженні, за якого ізотермічні поверхні становлять собою концентричні сфери), може бути записано так [11; 12]:

$$\frac{\partial [rT(r, \tau)]}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 [rT(r, \tau)]}{\partial r^2}. \quad (1)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с; R – радіус частки, м.

Початкові та граничні умови мають вигляд:

$$T(r, 0) = f(r); \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial \tau} = 0; \quad T(0, \tau) \neq \infty; \quad (3)$$

$$-\frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} + H[T_c - T(R, \tau)] = 0, \quad (4)$$

де $H =$;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

T_c – температура, до якої охолодилася поверхня бризки в початковий момент часу, К.

Розв'язуючи задачу операційним методом у тій її формі, яка базується на знаходженні відображення $L(s)$ від функції $f(t)$ за допомогою перетворювача Лапласа за умов (2) та (4):

$$T_L(r, s) - \frac{T_0}{s} = B \frac{\text{sh} \sqrt{\frac{s}{a}} r}{r},$$

де B – постійна.

Гранична умова (4) для відображення матиме вигляд:

$$-T'_L(R, s) + H\left[\frac{T_0}{s} - T_L(R, s)\right] = 0.$$

Використовуючи рекомендації [11], розв'язання поставленої задачі набуде вигляду:

$$\theta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (5)$$

є A_n – початкові теплові амплітуди, які визначаються зі співвідношення:

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi \sqrt{\mu_n^2 + (Bi - 1)^2}}{\mu_n^2 + Bi^2 - Bi},$$

μ_n – прості корні, які визначаються з характеристичного рівняння:

$$\text{tg} \mu_n = -\frac{\mu_n}{Bi - 1}, \quad (6)$$

Bi – критерій Біо.

Якщо вважати $Bi \rightarrow \infty$, то згідно з рівнянням (6) $\mu_n = n\pi$, а початкові теплові амплітуди дорівнюють:

$$A_n = 2(-1)^{n+1}.$$

Тоді рішення (5) набуде вигляду:

$$\theta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (7)$$

де Fo – критерій Фур'є;

T_0 – температура навколишнього середовища, у якому міститься бризка, К.

Використовуючи (7), розглянемо дві розплавлені частки – Fe та FeO , діаметром 2 мм кожна, які мають початкову температуру 1600 °С. При охолодженні до 150 °С частка Fe виділяє 154 Дж тепла, а частка FeO – 36,8 Дж. Проте це порівняння не розкриває повністю картину термонавантаження на покриття, оскільки частка FeO в польоті поступово охолоджується, тоді як частка Fe в польоті може навіть нагріватися через протікання реакції з виділенням тепла [12]. Окислення Fe за високих температур відбувається настільки швидко, що за 1 с утворюється оксидна плівка товщиною 0,001 мм. Оскільки швидкість хімічної реакції перебуває в логарифмічній залежності від температури, то реакція окислення протікає більш інтенсивно за високих температур [11]. Випромінювальна здатність є мірою швидкості, з якою випромінюється тепло з поверхні частки. Висока випромінювальна здатність частки особливо важлива у вільному польоті. При зіткненні частки

із захисним покриттям, навпаки, низька випромінювальна здатність. З погляду термічних збурень, що вносяться у вихідний стан захисного покриття, вагоме значення має форма часток, які співударяються з покриттям. При сферичній формі точка контакту, а отже, і теплопередача теплопровідністю мінімальна, і основна частина тепла передається випромінюванням. У разі плоских часток швидкість теплопередачі багатократно зростає. Частка, яка твердіє при польоті, набуває сферичної форми. Якщо вона досягає поверхні покриття в рідкому стані, то при затвердінні вона набуває напівсферичної форми з плоским майданчиком в зоні контакту з покриттям. Так, швидка кристалізація часток, що летять, може бути забезпечена окисненням до Fe_2O_3 (температура плавлення $1458^\circ C$), а не до FeO (температура плавлення $1380^\circ C$). При цьому взаємодія розплавленої бризки з навколишнім середовищем характеризується утворенням плівок оксидів. Одночасно протікають дифузійні процеси, які посилюються конвекційними потоками та механічним збуренням рідкого металу. У сталі, яка містить $0,025\% Fe_2O_3$ з 1 г металу за 3000 К утворюється $1,56\text{ см}^3 CO$, а в перерахунку на 1 см^3 металу за тієї ж температури – 11 см^3 . Розрахункові значення

тепловмісту часток залежно від їх розмірів (табл. 1) показують, що концентрація тепла зростає в кубі порівняно зі збільшенням діаметра. Тому найбільшу небезпеку для «пробою» покриття мають великі бризки, що кореспондуються з [10].

Так, максимальний ефект підвищення тепловкладення в покриття досягається при збільшенні розмірів бризок та швидкості теплопередачі.

Якщо критерій Біо малий ($Bi \rightarrow 0$), усі коефіцієнти $A_n \rightarrow 0$, окрім амплітуди $A_1=1$, а $\mu_1^2=3Bi$. У такому разі:

$$\theta = 1 - \frac{R \sin \sqrt{3Bi} \left(\frac{r}{R} \right)}{r \sqrt{3Bi}} e^{3BiFo}.$$

Теплові розрахунки з використанням цієї математичної моделі виконані за допомогою пакету скінчено-елементного аналізу LS-DYNA. У процесі руху до моменту контакту з поверхнею зварюваного металу крапля втрачає частину теплоти на променисту та конвективну тепловіддачу (рис. 1, а). Як приклад на рис. 1, б представлено температурне поле краплі: швидкість польоту $V = 1\text{ м/с}$, $2R = 0,003\text{ м}$, $T_{solidus} = 1451^\circ C$,

Таблиця 1

Випромінювальна здатність різних електродних бризок

Діаметр частки, мм	Крупність частки, меш	Маса частки, мг	Тепловміст, Дж	
			Fe	FeO
1,651	12	18,98	24,8	21,3
0,833	20	2,37	3,5	2,7
0,417	40	0,296	0,4	0,3
0,208	70	0,037	0,05	0,04
0,074	200	0,0017	0,0022	0,0019

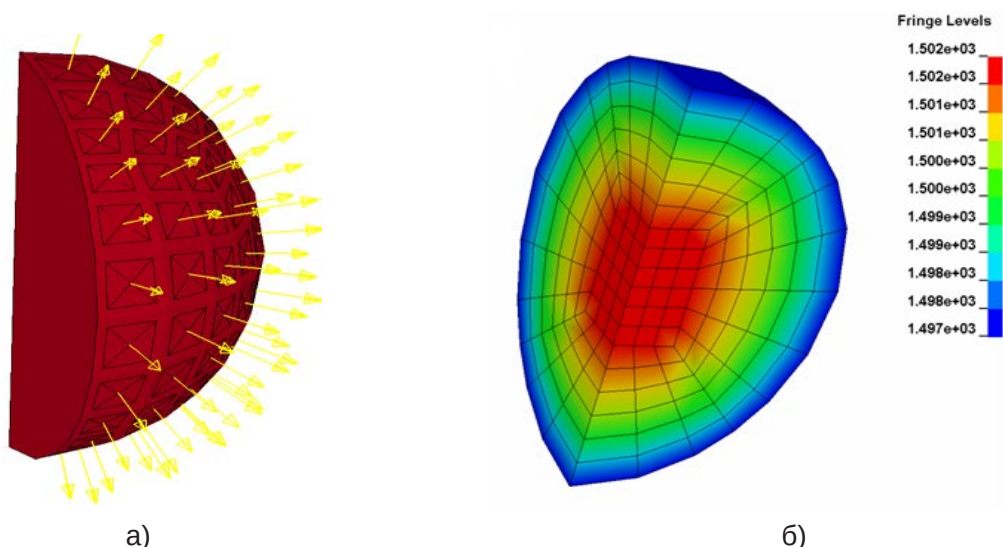


Рис. 1. Теплова модель бризки розплавленого металу з граничними умовами (2) – (4) (а) та її температурне поле (б)

$T_{\text{ліквідус}} = 1510^\circ\text{C}$, теплоємність варіюється від 486 до 250 Дж/(кг · К) при зміні температури від 20 до 1800 °С.

Результати. З метою оцінки теплового стану крапель розплавленого електродного металу після викидання з дугового проміжку проведено розрахунок зміни температурного поля електродної бризки в різних точках (рис. 2) (у центрі ядра (А 4), на поверхні бризки (С 270) та між ними (В 158)) залежно від часу її руху до контакту зі зварюваною поверхнею. Аналіз графічних залежностей одержаних результатів розрахунку (рис. 3), а також аналіз представленої математичної моделі теплової поведінки електродної бризки за різних умов показав, що за малих значень F_0 температура в центрі часток майже не змінюється.

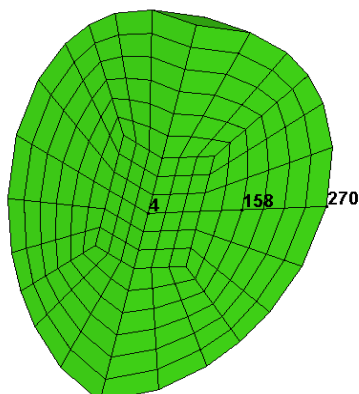


Рис. 2. Розташування фіксованих точок А 4, В 158, С 270

За одержаними результатами дослідження також установлено, що зміна температури на поверхні бризки розплавленого електродного металу відбувається в широких межах за малих значень критерію Фур'є F_0 та великих значень критерію Біо Bi . З аналізу представленої математичної моделі випливає, що зі зниженням критерію Біо середня температура бризки зменшується, а величина розплавленого об'єму бризок залежить від їх теплофізичних властивостей (коефіцієнта теплопровідності λ , питомої теплоємності c , коефіцієнта температуропровідності a), початкової температури T_0

та розмірів, відстані до поверхні ураження L , швидкості переміщення V_0 .

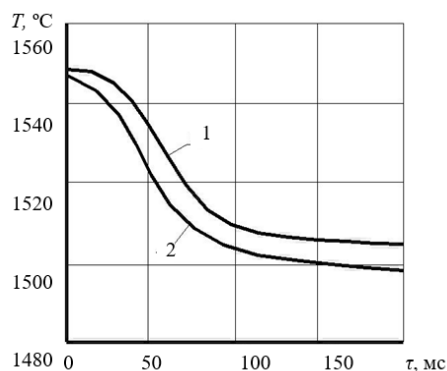


Рис. 3. Зміна температури бризки T у фіксованих точках: в центрі – А 4 (крива 1) та на поверхні – С 270 (крива 2) бризки ($2R = 0,003$ м) в різні моменти часу τ після викидання з дугового проміжку (розрахунок виконаний при $a = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $c = 400 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $\lambda = 32 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, $V_0 = 1 \text{ м/с}$, $T_0 = 1548^\circ\text{C}$)

Висновки. Одержано математичний опис теплової поведінки електродної бризки розплавленого металу після викидання з дугового проміжку, що дає змогу оцінити ступінь її охолодження в інтервалі температур навколишнього середовища та враховує питому поверхню бризки, її масу, теплофізичні властивості, відстань до поверхні ураження. Аналіз моделі показав, що за малих значень F_0 температура в центрі часток майже не змінюється, а зміна температури на поверхні бризки відбувається в широких межах за малих значень F_0 та великих Bi ; зі зниженням критерію Біо середня температура бризки зменшується. Величина розплавленого об'єму бризок залежить від їх теплофізичних властивостей (коефіцієнта теплопровідності λ , питомої теплоємності c , коефіцієнта температуропровідності a), початкової температури T_0 та розмірів, відстані до поверхні ураження L , швидкості переміщення V_0 , і є важливою характеристикою їх стану, яка впливає на ймовірність приварювання до поверхні металоконструкції.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Chen J. H., Sun Z. C., Fan D. Study on the mechanism of spatter produced by basic welding electrodes. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*. 1996. Vol. 75, no. 10. P. 311–316.
2. Molleda F., Mora J., Molleda J. R., Mora E. The importance of spatter formed in shielded metal arc welding. *Materials Characterization*. 2007. Vol. 58, no. 10. P. 936–940. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.09.01>
3. Kang S. K., Na S. J. A mechanism of spatter production from the viewpoint of the integral of specific current action. *Welding journal*. 2005. Vol. 84. P. 188–196.

4. Kang M. J., Kim Y., Ahn S., & Rhee S. Spatter rate estimation in the short-circuit transfer region of GMAW. *Welding Journal*. 2003. Vol. 82, no. 9. P. 238–247. URL: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=15110215>
5. Fed'ko V. T., Zernin E. A. Main reasons for splashing and methods of protection of welded components against molten metal splashes. *Welding international*. 2005. Vol. 19, no. 6. P. 495–497. <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3475>
6. Athi N., Cullen J. D., Al-Jader M., Wylie S. R., Al-Shamma'a A. I., Shaw A., Hyde M. Experimental and theoretical investigations to the effects of zinc coatings and splash on electrode cap wear. *Measurement*. 2009. Vol. 42, no. 6. P. 944–953. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.02.001>
7. Fotovvati B., Namdari N., Dehghanghadikolaei A. On coating techniques for surface protection: A review. *Journal of Manufacturing and Materials processing*. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 28. <https://doi.org/10.3390/jmmp3010028>
8. Спосіб виготовлення покриття для захисту поверхні від налипання бризок розплавленого металу: пат. 95020909 Україна: B23K35/36. № 4/1997; заявл. 27.02.1995; опубл. 29.08.1997, Бюл. № 4/1997. 4 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/836465/>
9. Склад покриття для захисту поверхні від налипання бризок розплавленого металу: пат. № 8107 Україна: B23K35/36. № u200500500; заявл. 19.01.2005; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7/2005. 2 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/285380/>
10. Kassov V., Berezshnaya E., Malyhin N., Antonenko Y., Zubenko K. Development of the protection coat for metallic structures based on the intercalated graphite compounds. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1045. P. 9–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.9>
11. Olson D. L., Dixon R. D., Liby A. L. *Welding: theory and practice*. Elsevier Science Publishers B. V., 2012. 389 p.
12. Karkhin V. A. *Thermal processes in welding*. Springer Singapore, 2019. 478 p.

REFERENCES:

1. Chen, J. H., Sun, Z. C., & Fan, D. (1996). Study on the mechanism of spatter produced by basic welding electrodes. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, 75(10), 311–316.
2. Molleda, F., Mora, J., Molleda, J. R., & Mora, E. (2007). The importance of spatter formed in shielded metal arc welding. *Materials Characterization*, 58(10), 936–940. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.09.01>
3. Kang, S. K., & Na, S. J. (2005). A mechanism of spatter production from the viewpoint of the integral of specific current action. *Welding journal*, 84, 188–196.
4. Kang, M. J., Kim, Y., Ahn, S., & Rhee, S. (2003). Spatter rate estimation in the short-circuit transfer region of GMAW. *Welding Journal*, 82(9), 238–247. Retrieved from <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=15110215>
5. Fed'ko, V. T., & Zernin, E. A. (2005). Main reasons for splashing and methods of protection of welded components against molten metal splashes. *Welding international*, 19(6), 495–497. <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3475>
6. Athi, N., Cullen, J. D., Al-Jader, M., Wylie, S. R., Al-Shamma'a, A. I., Shaw, A., & Hyde, M. (2009). Experimental and theoretical investigations to the effects of zinc coatings and splash on electrode cap wear. *Measurement*, 42(6), 944–953. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.02.001>
7. Fotovvati, B., Namdari, N., & Dehghanghadikolaei, A. (2019). On coating techniques for surface protection: A review. *Journal of Manufacturing and Materials processing*, 3(1), 28. <https://doi.org/10.3390/jmmp3010028>
8. Kassov, V. D. Kushi, T. K., Livshyts, M. H., & Malugina, S. V. (1997). *Sposib vyhotovlennia pokryttia dlia zakhystu poverkhni vid nalypannia bryzok rozplavlenoho metalu* (Patent of Ukraine № 95020909). State Intellectual Property Service of Ukraine. Retrieved from <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/836465/> [in Ukrainian].
9. Chyharov, V.V., & Malugina, S.V. (2005). *Sklad pokryttia dlia zakhystu poverkhni vid nalypannia bryzok rozplavlenoho metalu* (Patent of Ukraine № 8107). State Intellectual Property Service of Ukraine. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/285380/> [in Ukrainian].
10. Kassov, V., Berezshnaya, E., Malyhin, N., Antonenko, Y., & Zubenko, K. (2021). Development of the protection coat for metallic structures based on the intercalated graphite compounds. *Materials Science Forum*, 1045, 9–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.9>
11. Olson, D. L., Dixon, R. D., & Liby, A. L. (2012). *Welding: theory and practice*, 8, 389 p.
12. Karkhin, V. A. (2019). *Thermal processes in welding*, 492, 478 p.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 23.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 629.463.001.63

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-17>

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ НЕСУЧИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ КОРОЗІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ

Фомін Олексій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри вагонів та вагонних споруд
Освітньо-наукового Київського інституту залізничного транспорту,
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

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

Фоміна Анна Миколаївна,

доктор філософії,
старший викладач кафедри рухомого складу транспортних систем
Приазовського державного технічного університету
ORCID ID: 0000-0002-9810-8997

Любимова-Зінченко Ольга Валентинівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри фармації, виробництва та технологій
Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля
ORCID ID: 0000-0001-7510-5366

Черкашин Олександр Петрович,

аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин
Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля
ORCID ID: 0009-0006-6871-0860

У статті розглядаються методичні основи комплексного підходу до моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, що працюють в умовах інтенсивної корозійної деградації. Актуальність дослідження зумовлена критичним впливом корозії на безпеку, ресурс та економічну ефективність експлуатації різноманітних одиниць рухомого складу.

Метою роботи є розробка інтегрованого інструментарію, що дозволяє прогнозувати зміну несучої здатності конструкцій з часом.

Для досягнення мети автори використовують сучасні комп'ютерні технології та методи, включаючи системний аналіз, статистичну обробку даних про відмови, ймовірнісні моделі та комп'ютерне моделювання методом скінченних елементів для аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням втрати матеріалу. Розроблений підхід інтегрує моделі корозійного пошкодження різних типів (рівномірної, піттингової) в загальні моделі структурної надійності. Автоматизація розрахунків за рахунок спеціального програмного забезпечення підвищує точність прогнозування залишкового ресурсу.

Результати дослідження доводять, що ігнорування фактора корозії призводить до небезпечної переоцінки терміну безвідмовної роботи. Встановлено ключові параметри впливу, що дозволяють оптимізувати конструктивні рішення та матеріали для підвищення корозійної стійкості. Запропоновані методики становлять основу для переходу від планово-попереджувального технічного обслуговування до стратегії, заснованої на фактичному стані конструкції, що значно підвищує безпеку та економічну ефективність у сфері транспортних технологій. Розробки мають широкий потенціал для впровадження при проектуванні, виробництві та експлуатації різних видів транспортних засобів.

Ключові слова: транспорт, транспортні технології, несучі системи, комп'ютерні технології, автоматизація, комп'ютерне моделювання, надійність, корозія.

Fomin Oleksii, Burlutsky Oleksii, Fomina Anna, Liubymova-Zinchenko Olha, Cherkashin Oleksandr.
Modeling and life prediction of corroded vehicle frame structures: a reliability-based approach

The article presents on methodological foundations for a comprehensive approach to modeling and assessing the reliability of load-bearing systems in vehicles operating under conditions of intensive corrosive degradation. The relevance of the study is determined by the critical impact of corrosion on the safety, service life, and economic efficiency of various rolling stock units.

The aim of the work is to develop an integrated toolkit that allows predicting changes in the load-bearing capacity of structures over time. To achieve this goal, the authors utilize modern computer technologies and methods, including systems analysis, statistical processing of failure data, probabilistic models, and computer modeling using the finite element method to analyze the stress-strain state considering material loss. The developed approach integrates models of various types of corrosion damage (uniform, pitting) into general structural reliability models. The automation of calculations through specialized software enhances the accuracy of residual life prediction.

The study results prove that ignoring the corrosion factor leads to a dangerous overestimation of the mean time between failures. Key influence parameters have been established, enabling the optimization of design solutions and materials to improve corrosion resistance. The proposed methodologies form the basis for transitioning from scheduled preventive maintenance to a condition-based strategy, significantly enhancing safety and economic efficiency in the field of transport technologies. The developments have broad potential for implementation in the design, production, and operation of various types of transport vehicles.

Key words: transport, transport technologies, load-bearing systems, computer technologies, automation, computer modeling, reliability, corrosion.

Вступ. Сучасний транспортний сектор відіграє ключову роль у світовій економіці, забезпечуючи мобільність товарів та пасажирів. Надійність транспортних засобів є фундаментальним аспектом, що безпосередньо впливає на безпеку, економічну ефективність та екологічність експлуатації. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року передбачає продовження європейських транспортних коридорів в східному напрямку і активну участь у перевізному процесі євразійського транзиту в рамках вимог та нормативів Євросоюзу [1].

Саме тому актуальність науково-прикладних досліджень у сфері моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, особливо з урахуванням корозійної деградації, набуває особливого значення. Корозія – це незворотний процес руйнування металів внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем. Цей процес є одним із головних факторів, що обмежують термін служби несучих елементів транспортних засобів.

Ігнорування корозійних процесів призводить до непередбачених відмов, що можуть мати катастрофічні наслідки. Руйнування несучих конструкцій через корозію може спричинити аварії з людськими жертвами та значними матеріальними збитками. Експлуатація транспортних засобів із пошкодженими корозією елементами є прямою загрозою безпеці дорожнього руху. Навіть незначна корозія може значно знизити несучу здатність конструкції, роблячи її вразливою до динамічних навантажень. Відновлення та ремонт пошкоджених корозією елементів вимагає значних фінансових та часових витрат. Запобігання корозії та своєчасна оцінка

її впливу є значно економічнішими за усунення наслідків.

Втрата надійності транспортних засобів через корозію призводить до збільшення витрат на технічне обслуговування та ремонт. Передчасний вихід з ладу транспортних засобів знижує їхню рентабельність та потребує додаткових інвестицій у оновлення парку. Необхідність частих ремонтів через корозію негативно впливає на загальну продуктивність транспортних підприємств. Крім того, непередбачені поломки, спричинені корозією, можуть призвести до затримок у доставці вантажів та пасажирів, що негативно позначається на логістичних ланцюгах. Це також може підірвати репутацію перевізника, призводячи до втрати клієнтів.

Науково-прикладні дослідження в цій галузі дозволяють розробити методичні основи для прогнозування поведінки несучих систем. Створення адекватних математичних моделей для опису процесів корозійної деградації є першочерговим завданням. Ці моделі повинні враховувати різні види корозії: рівномірну, точкову, міжкристалітну, щільну та інші. Необхідно також розробити методики для оцінки впливу корозії на втомну міцність матеріалів. Адже саме втома, прискорена корозією, є однією з найпоширеніших причин руйнування несучих елементів.

Розробка та впровадження нових методів неруйнівного контролю для виявлення корозійних пошкоджень є критично важливими. Застосування сучасних сенсорних технологій дозволить моніторити стан несучих систем у режимі реального часу. Це дасть змогу завчасно виявляти потенційні проблеми та планувати профілактичні заходи. Дослідження також мають

бути спрямовані на розробку нових матеріалів з підвищеною корозійною стійкістю та захисних покриттів. Впровадження інноваційних технологій поверхневої обробки може значно підвищити довговічність транспортних засобів.

Оцінка надійності з урахуванням корозійної деградації дозволяє оптимізувати інтервали технічного обслуговування. Це дає можливість перейти від планово-запобіжних ремонтів до ремонтів за фактичним станом. Такий підхід є значно ефективнішим та економічнішим. Прогнозування залишкового ресурсу транспортних засобів з урахуванням корозії дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо їх подальшої експлуатації або виведення з експлуатації. Це мінімізує ризики аварій та оптимізує витрати.

Результати цих досліджень мають пряме практичне застосування у проектуванні нових транспортних засобів. Вони дозволяють закладати в конструкції більш стійкі до корозії рішення та матеріали. Це значно підвищить початкову надійність та довговічність транспортних засобів. Також отримані знання будуть корисними для розробки рекомендацій щодо експлуатації та обслуговування існуючого парку. Це включає розробку ефективних стратегій захисту від корозії та ремонтних технологій.

Важливим аспектом є також розробка програмного забезпечення для моделювання та оцінки надійності. Це дозволить автоматизувати складні розрахунки та підвищити точність прогнозування. Створення інтегрованих систем моніторингу та діагностики, що враховують корозійні процеси, є наступним кроком. Ці системи зможуть в реальному часі аналізувати дані про стан несучих систем та видавати рекомендації. Наявність таких систем дозволить підвищити безпеку експлуатації та мінімізувати ризики.

Отже, актуальність проведення науково-прикладних досліджень з обраного напрямку є беззаперечною. Ці дослідження є критично важливими для забезпечення безпеки, економічної ефективності та екологічної сталості транспортного сектору. Вони дозволяють підвищити довговічність транспортних засобів, знизити експлуатаційні витрати та мінімізувати ризики аварій. Це забезпечить сталий розвиток транспортної галузі та підвищить її конкурентоспроможність на світовому ринку. Враховуючи глобальні тенденції, ці дослідження мають стати пріоритетними для наукової спільноти та інженерної галузі.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики. У статті [2] розглядається проблема прогнозування та запобігання

корозії критично важливих елементів залізничних вантажних вагонів, зокрема шворневої балки. Автори досліджують агресивний вплив експлуатаційного середовища та розвивають підходи до моделювання корозійних процесів. Встановлено, що прогнозований розподіл корозії в часі є основою для розробки нових стандартів та нормативів у вагонобудуванні, спрямованих на забезпечення безпечної експлуатації рухомого складу. Методика дозволяє оцінити вплив корозії на надійність конструкцій та обґрунтувати заходи щодо продовження терміну їх служби.

У науковій роботі [3] розглядається ймовірнісний метод оцінки надійності корозійно-пошкоджених рам транспортних засобів. Автори використали метод Монте-Карло для аналізу впливу випадкових факторів. Результати показали, що традиційні детерміновані методи можуть недооцінювати ризик руйнування. Запропоновано новий критерій оцінки залишкової міцності.

Стаття [4] пропонує методику прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, що працюють у умовах корозійно-втомного руйнування. Автори поєднали експериментальні дані з числовим моделюванням. Встановлено, що поєднання корозії та циклічних навантажень прискорює деградацію матеріалів. Методика дозволяє точніше оцінювати термін експлуатації.

У цій [5] статті узагальнено принципи, технічні характеристики, методи характеристики та тенденції розвитку електрохімічних і фізичних технологій моніторингу корозії арматури в бетоні. Огляд може бути корисною відправною точкою для подальших досліджень.

У дослідженні [6] за допомогою калібрувального тесту було встановлено, що співвідношення між швидкістю зміни напруги, вимірюваною за допомогою MCD, та швидкістю корозії сталевих арматур є лінійним, а корозію сталевих арматур можна кількісно виявити за допомогою лінійної формули апроксимації. Прискорені випробування на корозію залізобетонних балок із вбудованим датчиком показали, що прилад MCD для виявлення корозії сталі має високу точність вимірювання, а крива, що змінюється в часі. Запропоновано новий підхід до розрахунку безпечного ресурсу конструкцій.

Дослідження [7] присвячене визначенню оптимальних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену. Автори поєднали теоретичні розрахунки з експериментальними випробуваннями, що дозволило обґрунтувати вибір ключових характеристик системи. Результати показали, що застосування таких накопичувачів може

значно підвищити енергоефективність рухомого складу. Особлива увага приділена методам розрахунку ємності та напруги, необхідних для стабільної роботи.

У статті [8] розглядається корозію трубопроводів, що зазнали просторово-часового землетрусу, щоб проілюструвати ймовірність відмови в умовах багаторазового навантаження. Віб्राція трубопроводу була змодельована як зв'язане тривимірне рівняння вібрації з урахуванням невизначених параметрів ґрунту. Методика дозволяє оцінити ймовірність руйнування з урахуванням реальних умов експлуатації трубопроводу.

У статті [9] розглядається проблема вибору раціональних параметрів ємнісного накопичувача для підземного транспорту. Автори запропонували методику розрахунку, яка враховує специфічні умови експлуатації, такі як обмежений простір і високі динамічні навантаження. Встановлено, що оптимальні параметри системи залежать від режимів гальмування та прискорення. Результати дослідження можуть бути використані для проектування більш ефективних систем рекуперації енергії.

Дослідження [10] присвячене чисельному моделюванню та програмне моделювання на сьогоднішній день є дуже ефективними інструментами як для розуміння та прогнозування процесів корозії, так і для захисту металевих компонентів. Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics надає перевірені математичні моделі, які можуть бути використані для певної геометрії як інструмент для прогнозування та запобігання корозії компонентів. У цій роботі було досліджено корозію оцинкованих сталевих листів шляхом порівняння результатів моделювання з лабораторними випробуваннями, проведеними в сольовому тумані. Робота має важливе значення для проектування більш довговічних конструкцій.

У статті [11] визначено критичний рівень корозії, при якому сталеві рами транспортних засобів втрачають несучу здатність. Автори провели серію механічних випробувань зразків з різним ступенем корозійного ушкодження. Встановлено, що втрата маси понад 15-20% призводить до катастрофічного зниження міцності. Результати дозволяють встановити обґрунтовані межі безпечної експлуатації.

Робота [12] демонструє ефективність методу акустичної емісії (АЕ) для ранньої діагностики корозії арматури в залізобетонних конструкціях. Шляхом безперервного моніторингу балок у вологому та сухому середовищах вдалося ідентифікувати початок корозійного процесу та

утворення відповідних тріщин у бетоні. Результати аналізу параметрів АЕ були верифіковані за допомогою електронного зондового мікроаналізатора (EPMA). Отримані дані свідчать, що метод АЕ є перспективним інструментом для кількісної оцінки ранніх стадій корозії.

Наукове дослідження [13] зосереджене на кількісній оцінці невизначеностей при аналізі надійності корозійно-пошкоджених конструкцій. Автори застосували методи стохастичного моделювання для врахування розкиду експериментальних даних. Показано, що ігнорування невизначеностей може призводити до неконсервативних оцінок ресурсу. Запропоновано підхід до калібрування коефіцієнтів безпеки з урахуванням статистичних даних.

Дослідження [14] фокусується на оцінці довговічності несучої конструкції відкритого вантажного вагона з круглих труб під час транспортування на залізничному паромі. Автори використали методи скінченних елементів для аналізу напружень, викликаних хитами. Результати показали, що конструкція з круглих труб має достатню міцність, але потребує додаткового кріплення для зменшення динамічних навантажень. Робота має важливе значення для забезпечення безпеки перевезень.

У статті [15] розроблено ймовірнісну модель прогнозування корозійної деградації несучих систем. Особливістю роботи є врахування впливу експлуатаційних факторів (клімат, інтенсивність використання). Модель дозволяє прогнозувати розподіл корозійних пошкоджень у часі з заданою ймовірністю. Результати можуть бути використані для оптимізації графіків технічного обслуговування.

У статті [16] досліджується вплив в'язкого зв'язку на динамічні навантаження напіввагона під час його кріплення до палуби парома. Автори провели експериментальні та чисельні дослідження, які показали, що використання в'язкого зв'язку дозволяє значно знизити динамічні навантаження. Це особливо важливо для запобігання пошкодженням вантажу та конструкції вагона. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення методів кріплення рухомого складу на паромі.

Дослідження [17] присвячене оптимізації систем захисту від корозії на основі критеріїв надійності. Автори розробили методологію вибору оптимальних матеріалів покриттів з урахуванням вартісних обмежень. Показано, що правильний вибір захисту може збільшити ресурс конструкцій на 30-50%. Результати мають важливе практичне значення для виробництва транспортних засобів.

У роботі [18] досліджено вплив корозійних дефектів на втомну міцність рам. Автори провели комплексні випробування на втому зразків з штучно створеними корозійними дефектами. Встановлено, що навіть невеликі поверхневі пошкодження можуть знизити втомний ресурс у 2-3 рази. Запропоновано модифіковані криві втоми для корозійно-пошкоджених матеріалів.

Стаття [19] пропонує інтегрований підхід до оцінки надійності, який поєднує аналіз корозійної деградації з розрахунком динамічних характеристик. Автори розробили комплексну модель, що враховує взаємодію корозії, вібрацій і ударних навантажень. Показано, що динамічні ефекти можуть прискорювати розвиток корозійно-втомних тріщин. Методика дозволяє точніше прогнозувати залишковий ресурс конструкцій.

В роботі [20] викладена методика виявлення типових несправностей і величин корозійного зносу. Ущерб от коррозии в СНГ: ~2% от стоимости парка ежегодно.

В роботі [21] виконано аналіз парку вантажних вагонів, які вичерпали свій первісний ресурс на території України та країн СНД. Показано несправності вантажних вагонів, принцип проведення та методи технічного діагностування з використанням оцінки технічного стану вантажних вагонів.

Аналіз літератури чітко засвідчив, що питанню визначення методичних основ моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів з урахуванням їх корозійної деградації не приділено достатньої уваги. Попри очевидну актуальність проблеми корозії, яка значно впливає на термін служби та безпеку експлуатації, існуючі наукові дослідження не повною мірою охоплюють комплексний підхід до цієї теми. Це створює суттєвий пробіл у розумінні динаміки деградації матеріалів та її впливу на несучі конструкції. Відсутність системних методик ускладнює точне прогнозування залишкового ресурсу та розробку ефективних стратегій обслуговування. Отже, існує нагальна потреба в поглиблених дослідженнях, спрямованих на розробку комплексних моделей, що інтегруватимуть фактори корозійної деградації. Це дозволить підвищити надійність та безпеку транспортних засобів протягом усього їхнього життєвого циклу.

Методи та методики дослідження. У дослідженні були застосовані методи системного аналізу для вивчення складної взаємодії між надійністю несучих систем, корозійною деградацією та умовами експлуатації транспортних засобів. Для кількісної оцінки впливу корозії на несучі елементи було використано методи

статистичного аналізу даних про відмови та пошкодження, зібраних в реальних умовах експлуатації. Розробка математичних моделей надійності здійснювалася за допомогою методів теорії ймовірностей та математичної статистики, що дозволило прогнозувати ресурс елементів з урахуванням стохастичного характеру корозійних процесів. Методи комп'ютерного моделювання, зокрема метод скінченних елементів, використовувалися для імітації поведінки конструкцій та розрахунку напружено-деформованого стану з урахуванням зменшення товщини матеріалу через корозію.

Методики експериментального дослідження, включаючи випробування на корозійну стійкість та навантаження, були проведені для верифікації розроблених моделей та уточнення їх параметрів. Для комплексної оцінки надійності та прийняття рішень щодо ремонту або заміни елементів застосовувалися методи багатокритеріальної оптимізації, що враховують як технічні, так і економічні аспекти.

Метою науково-прикладного дослідження є розробка методичних основ для моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, беручи до уваги їх корозійну деградацію. Дослідження спрямоване на створення інструментарію, який дозволить прогнозувати зміну надійності під впливом корозії та оптимізувати термін служби транспортних засобів. Отримані результати сприятимуть підвищенню безпеки експлуатації та ефективності використання транспортних засобів.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- проаналізувати та узагальнити наявні методики моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, акцентуючи увагу на підходах до врахування корозійної деградації;
- розробити математичні моделі корозійної деградації матеріалів несучих систем, що враховують вплив експлуатаційних факторів та часові характеристики розвитку корозії;
- сформулювати методичні основи інтеграції моделей корозійної деградації в загальні моделі надійності несучих систем транспортних засобів;
- розробити алгоритми та програмне забезпечення для чисельної реалізації запропонованих методичних основ моделювання та оцінки надійності;
- провести експериментальні дослідження для верифікації розроблених моделей та методик, використовуючи зразки матеріалів та елементів несучих систем;

– визначити ключові параметри, що впливають на надійність несучих систем з урахуванням корозійної деградації, та розробити рекомендації щодо їх оптимізації;

– сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення надійності несучих систем транспортних засобів шляхом впровадження запропонованих методичних основ у процес проектування та експлуатації.

Об'єктом дослідження є несучі системи транспортних засобів, які зазнають впливу корозійної деградації.

Предметом дослідження є методичні основи моделювання та оцінки надійності цих систем, з особливим акцентом на інтеграції чинника корозійної деградації.

Результати та дискусії. Прогнозування залишкового ресурсу несучих елементів транспортних засобів (рам вантажних вагонів, шворневих балок, елементів кузова) вимагає переходу від якісних оцінок до кількісних моделей, що інтегрують механіку руйнування та кінетику корозійних процесів. Основним параметром, що визначає міцність тонкостінних конструкцій, є товщина стінки елемента. Корозія призводить до її системного зменшення, що можна описати детерміновано або стохастично.

Надійність та довговічність несучої системи транспортного засобу (ТЗ) в процесі експлуатації значною мірою детерміновані процесами корозійно-механічного зношування. Згідно з даними діагностики технічного стану, до 95% вузлів, що працюють в умовах агресивних середовищ, схильні до корозійного руйнування [22]. Це обумовлює актуальність розробки детерміновано-ймовірнісних моделей оцінки залишкового ресурсу з урахуванням показника корозійної стійкості матеріалу та дає можливість переходу від концепції регламентованих ремонтів до стратегії технічного обслуговування за станом [23].

Для кількісної оцінки корозійних факторів руйнування несівних елементів кузова напіввагону було проведено розрахункові дослідження напружено-деформованого стану їх несучих конструкцій методом кінцевих елементів, у комп'ютерному пакеті моделювання SolidWorks. Побудовану кінцево-елементну 3D-модель наведено на рисунку 1 з урахуванням отриманих даних корозійного зносу, елементів вантажних вагонів отриманих в статті [2].

Методика оцінки корозійного зносу на основі показника стійкості

Основним параметром, що кількісно характеризує деградацію, є зменшення розрахункової товщини стінки елемента. У роботі запропоновано комплексний підхід, що базується на визначенні

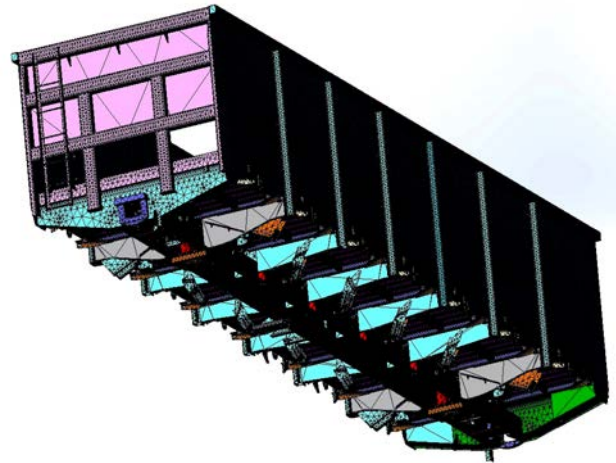


Рис. 1. Модель кузова напіввагона з урахуванням отриманих даних корозійного зносу елементів

коефіцієнта корозійної стійкості q_k , який інтегрує вплив різних видів корозії та умов експлуатації.

Залежність товщини металу від терміну служби гондольних вагонів була отримана шляхом апроксимації лінійною моделлю (рівномірна корозія) (1) та параболічною моделлю (при окисленні) з використанням методу найменших квадратів (МНК). [2,22,23]:

$$L_{(kmp)} = b_0 - f \cdot t_i, \quad (1)$$

$$L_{(kmp)oks} = b_0 - f \cdot \sqrt{t_i} \quad (2)$$

Початкова (проектна) товщина формується з урахуванням корозійного припуску:

$$L_n = L_p + C_{oi} + C_k, C_{oi} = T_s \cdot V_k \quad (3)$$

де C_{oi} – припуск на корозію, T_s – призначений строк служби, V_k – швидкість корозії, C_k – конструктивний припуск.

Кількісні показники різних видів корозії Для кількісної оцінки деградації запропоновано набір показників, які визначаються за стандартизованими методиками [24,25]:

Втрата маси на одиницю площі при суцільній корозії:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{F} \quad (4)$$

Зміна товщини: $\Delta L = \Delta m / \rho$

Ступінь ураження поверхні плямами корозії:

$$G = (\sum F_i / F) \cdot 100\% \quad (5)$$

Лінійна швидкість корозії: $V_i = \Delta L_i / \tau_i$

Інтегральним показником, що враховує комбінацію факторів, є коефіцієнт корозійної стійкості:

$$q_k = f(\Delta m_i, \Delta L_i, \Delta H_i, G, L_i, \tau_{mi}, \tau_i) \quad (6)$$

Моделювання зміни запасів товщини та міцності Нормативний запас товщини на момент досягнення граничного стану:

$$n_{st}^s = L_p / L_{min} = 1.5. \quad (7)$$

Фактичний запас товщини на момент k -го технічного діагностування (ТД) з урахуванням деградації:

$$n_k^s = q_k \cdot \frac{L}{L_{min}} \quad (8)$$

Коефіцієнт безпеки (запас на знос), що показує допустиму подальшу деградацію:

$$K_k^s = \frac{n_k^s}{n_i^s - n_k^s} \quad (10)$$

Оцінка впливу корозії на запас товщини елементів вагону. На основі запропонованої методики проведено розрахунки зміни запасу товщини стінки рами ТЗ при прогресуючій корозії дані наведено в таблиці 1.

Аналіз даних показує, що зі зменшенням товщини Z профілю хребтової балки на відносно номіналу, запас міцності падає непропорційно швидше, особливо при погіршенні корозійної стійкості ($q_k = 0.8$). Це підкреслює важливість регулярного моніторингу стану та фактора q_k . В якості прикладу наведен графік розрахунку запасів товщини Z профілю, хребтової балки при її зменшенні наведено на рисунку 2.

Прогнозування ресурсу на основі комплексного критерію Для практичного прогнозування залишкового ресурсу (T_k^s) запропоновано модель, що інтегрує стан матеріалу, результати діагностики та потенційний ризик:

$$T_k^s = \sqrt{W_k \cdot \beta_k \cdot \left(q_k \cdot \frac{n_k^s}{n_i^s - n_k^s} \right)^2} \quad (11)$$

де W_k – ефективний обсяг ТД,
 β_k – коефіцієнт дефектності,
 n_i^s – початковий запас товщини.

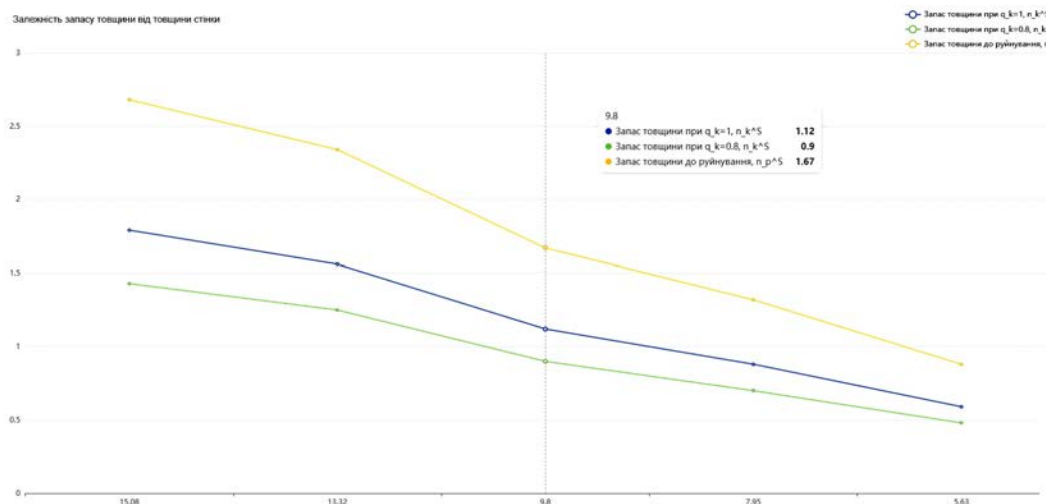


Рис. 2. Розрахунок запасів товщини Z профілю хребтової балки при її зменшенні

Таблиця 1

Розрахунок запасів товщини стінки Z профілю хребтової балки при її зменшенні

Товщина стінки L_k , мм	15,08	13,32	9,8	7,95	5,63
Запас товщини при $q_k = 1$, n_k^s	1,79	1,56	1,12	0,88	0,59
Запас товщини при $q_k = 0,8$, n_k^s	1,43	1,25	0,90	0,70	0,48
Запас товщини до руйнування, n_p^s	2,68	2,34	1,67	1,32	0,88

Таблиця 2

Розбиття основних параметрів ресурсу Z профілю хребтової балки на етапах життєвого циклу

Ресурс	Товщина, мм	Запас товщини	Запас міцності
Проектний T_n	14,0	2,17	1,50
Початковий T_0	14,0	2,17	1,50
Поточний T_k	9,4	1,42	1,27
Залишковий $T_{ост}$	6,95	1,17	1,17

В якості прикладу наведено графік прогнозування ресурсу Z профілю хребтової балки на основі комплексного критерію рис. 3.

Урахування категорії небезпеки при прогнозуванні ресурсу Для обґрунтування міжремонтних інтервалів розроблено модель, що дозволяє будувати залежності залишкового ресурсу для обладнання різних груп небезпеки. Вихідні дані для побудови таких залежностей представлені в таблиці 3.

Графіка залежності залишкового ресурсу хребтової балки від поточного запасу міцності рисунок 4.

Результати та дискусії. Надійність транспортних засобів є критично важливим фактором для забезпечення безпеки перевезень та ефективності експлуатації. Несучі системи, що є основними конструктивними елементами, що сприймають навантаження, відіграють ключову роль у цій надійності. Однак, з плином часу, ці

системи піддаються різним видам деградації, серед яких корозія є однією з найбільш руйнівних та поширених. Вплив корозійної деградації на несучі системи транспортних засобів залишається недостатньо вивченим і врахованим у сучасних методиках моделювання та оцінки надійності. Існуючі моделі часто не повною мірою відображають складність взаємодії між механічними навантаженнями та корозійними процесами, що призводить до неточної оцінки залишкового ресурсу та підвищених ризиків експлуатації.

Відсутність комплексних методичних основ, що дозволяють інтегрувати дані про корозійну деградацію в моделі надійності, ускладнює прогнозування технічного стану транспортних засобів. Це створює серйозні виклики для розробників, виробників та експлуатаційних організацій, оскільки непередбачувані відмови через корозійне пошкодження можуть призвести до

Таблиця 3

Дані для побудови графіка залежності залишкового ресурсу хребтової балки від поточного запасу міцності.

Поточний запас міцності, η_k	Група небезпеки 1, T_k^s	Група небезпеки 2, T_k^s	Група небезпеки 3, T_k^s	Група небезпеки 4, T_k^s
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.1	0.65	0.58	0.52	0.48
1.2	0.92	0.82	0.74	0.68
1.5	1.50	1.33	1.20	1.11
2.0	2.00	1.78	1.60	1.48
2.1	2.06	1.83	1.65	1.52

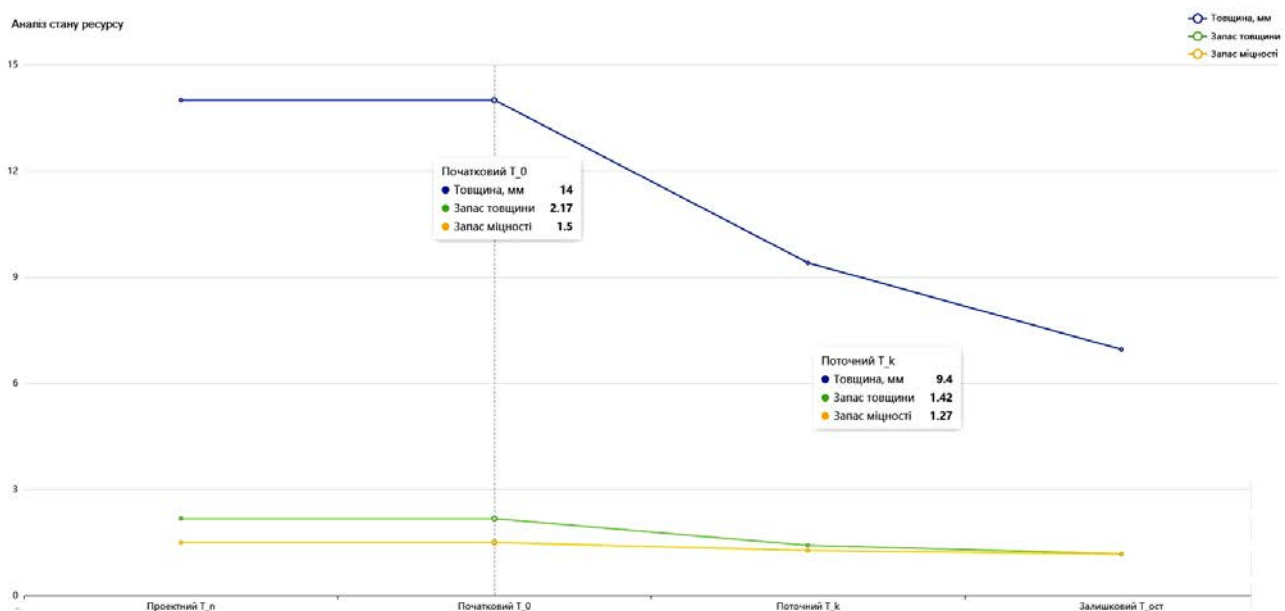


Рис. 3. Прогнозування ресурсу Z профілю хребтової балки на основі комплексного критерію

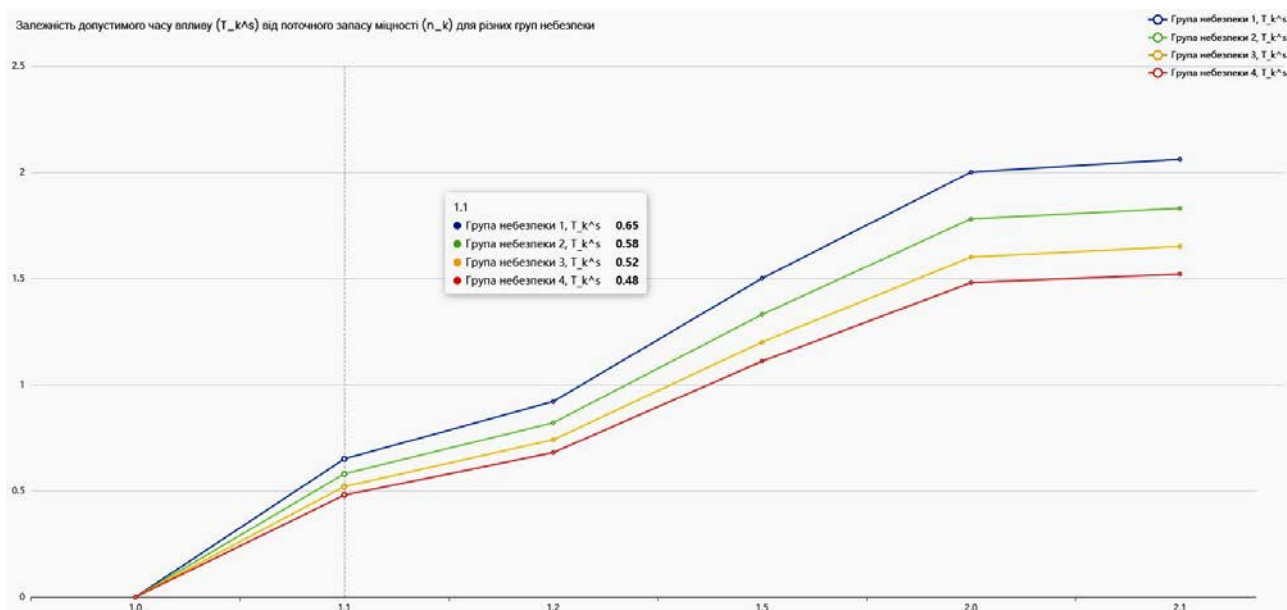


Рис. 4. Графік залежності залишкового ресурсу хребтової балки від поточного запасу міцності

значних фінансових втрат, затримок у перевезеннях та, що найважливіше, до аварій. Необхідність розробки нових підходів, що враховують динаміку корозійних процесів та їх вплив на міцність і жорсткість несучих елементів, стає очевидною. Поточні методики оцінки надійності часто базуються на ідеалізованих умовах, не беручи до уваги реальні експлуатаційні фактори, що прискорюють корозію, такі як вплив агресивних середовищ, коливання температур та механічні пошкодження захисних покриттів. Тому, розробка обґрунтованих методичних основ моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, що інтегрують аспекти їх корозійної деградації, є важливим науково-прикладним завданням.

Висновки. Розроблена методична база дозволяє інтегрувати фактор корозійної деградації безпосередньо в моделі оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, що істотно підвищує адекватність прогнозів.

Запропоновані моделі враховують зміни механічних характеристик матеріалів внаслідок корозійного пошкодження, що дає змогу точніше прогнозувати їхній залишковий ресурс.

Встановлено, що ігнорування корозії призводить до значної переоцінки терміну безвідмовної роботи несучих систем, що може мати критичні наслідки для безпеки експлуатації.

Визначено ключові параметри корозійного впливу (наприклад, швидкість корозії, тип середовища, концентрація агресивних компонентів), які є визначальними для розрахунку зниження несучої здатності.

Розроблений підхід дозволяє проводити оптимізацію матеріалів та конструктивних рішень з метою підвищення корозійної стійкості та, відповідно, загальної надійності транспортних засобів.

Впровадження запропонованих методик дасть змогу здійснювати ефективніше планування технічного обслуговування та ремонту, ґрунтуючись на реальному стані несучих елементів.

Побудовані прогностичні моделі дозволяють оцінювати вплив різних видів корозії (рівномірної, пітингової, міжкристалічної) на показники надійності, що є важливим для диференційованого підходу до захисту.

Обґрунтовано необхідність безперервного моніторингу корозійного стану критичних елементів несучих систем для своєчасного виявлення деградаційних процесів.

Запропоновано методику оцінки залишкового ресурсу несучої системи ТЗ, яка ґрунтується на використанні динамічного показника корозійної стійкості матеріалу $\ll Eqn039.eps \gg$, що дозволяє більш адекватно враховувати реальну деградацію в умовах експлуатації.

Розроблені розрахункові залежності та модель дозволяють прогнозувати ресурс як функцію від поточного запасу міцності, результатів технічного діагностування та категорії ризику обладнання.

Запропонований підхід створює основу для переходу від планово-попереджувальної системи ремонтів до системи технічного обслуговування за фактичним технічним станом, що може суттєво підвищити економічну ефективність експлуатації ТЗ та зменшити ризики аварійних відмов.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Про Національну транспортну стратегію України на період до 2030 року : постанова Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n17> (дата звернення: 03.03.2025).
2. Fomin O. V., Burlutskiy O. V., Kulbovskiy I. I., Veremeienko L. A. Modelling and prevention of corrosion in load-bearing elements of freight cars. *Municipal Economy of Cities. Series: Technical Sciences and Architecture*. 2025. 3(191). 597–605. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-597-605>
3. Chenxing Cui, Li Song, Jinliang Liu and Zhiwu Yu ,Corrosion-Fatigue Life Prediction Modeling for RC Structures under CoupledCarbonation and Repeated Loading. *Mathematics* 2021. 9(24). 3296. <https://doi.org/10.3390/math9243296>
4. Hrabová K., Lehner P., Ghosh P., Konečný P., Teplý B., Sustainability Levels in Comparison with Mechanical Properties and Durability of Pumice High-Performance Concrete. *Appl. Sci.* 2021. 11. 4964. <https://doi.org/10.3390/app11114964>
5. Qiang Li, Jintao Lan, Lu Shen, Jiping Yang, Chong Chen, Zhilu Jiang, Chao Wang. A state-of-the-art review on monitoring technology and characterization of reinforcement corrosion in concrete Case Studies in Construction Materials. Vol. 22. July 2025, e04780 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04780>
6. Jin G., Jiang Y., Tian Y., et al. Design and application of MCD steel reinforcement corrosion detection apparatus, *J. Build. Mater.*, 23 (03) (2020), pp. 733-738 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2020.03.035>
7. A. O. Sulym, O. V. Fomin, P. O. Khozia, A. G. Mastepan , Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock, *Scientific Bulletin of the National Mining University*. 2018. № 5. С. 79–87. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
8. Wang Y., Zhang P., Qin G. Reliability assessment of pitting corrosion of pipeline under spatiotemporal earthquake including spatial-dependent corrosion growth. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 148. P. 166–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.005>
9. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2. № 1. P. 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>.
10. Ferrarotti A., Ghiggini E.V., Rocca R. et al. Simulation of corrosion phenomena in automotive components: a case study. *Materials*. 2023. Vol. 16. № 15. P. 5368. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155368>
11. Tran L., Nguyen T.-H. Effect of Metal Corrosion on the Structural Reliability of the 3D Steel Frames. *Advances in Engineering Research and Application. Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications, ICERA 2020* : матеріали конф. 2021. P. 39–44. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0053-1_5
12. Kawasaki Y., Shiotani T., Ohtsu M. Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. P. 1240–1247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.020>
13. Luo Y., Zhang C., Liu J. Identifying ship-wakes in a shallow estuary using machine learning. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 245. P. 110456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110456>
14. Fomin O. et al. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21. № 1. P. 28–34. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.1.28-34>
15. Melchers R.E. Mathematical modelling of the diffusion phase of marine corrosion. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2003. Vol. 125. № 4. P. 264–271. <https://doi.org/10.1115/1.1600467>
16. Фомін О., Ловська А., Кульбовський І., Голуб Г., Козарчук І., Харута В. Визначення динамічного навантаження на піввагон при його кріпленні в'язким з'єднанням до палуби парома. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2019. № 2. С. 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456>
17. Wang J., Zhang R. Reliability-Based Optimization Design of Variable Cross-Section Component. *Corrosion Science*. 2020. Vol. 174. P. 108840. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108840>.
18. Qu C.-X., Jiang J.-Z., Yi T.-H., Li H.-N. Computer vision-based 3D coordinate acquisition of surface feature points of building structures. *Engineering Structures*. 2024. Vol. 300. P. 117212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117212>
19. Sadeghian M. The Reliability Assessment of a Ship Structure under Corrosion and Fatigue, using Structural Health Monitoring. *International Journal of Engineering*. 2022. Vol. 35. № 9C. P. 1765–1778. <https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.09C.13>
20. Анофрієв В. Г., Донєв О. А., Мацюк А. С., Оберняк С. М. Аналіз виникнення несправностей та зносу елементів шворневої балки піввагона. *Вісник Дніпропетровського національного університету заліз-*

ничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2012. Вип. 41. С. 7–10. DOI: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/0a889730-e131-4ee4-8a3f-1250c615c159/content>

21. Сапронова С. Ю., Буліч Д. І., Ткаченко В. П. Продовження терміну експлуатації вантажних вагонів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 3. С. 179–182.

22. Пухлій В. М., Шевченко О. А. Діагностика технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу металевих конструкцій транспортних засобів. Київ : НТУ, 2018. 210 с.

23. Коваленко В. С., Білоног О. М. Стратегії технічного обслуговування та ремонту машин на засадах надійності. *Вісник Національного транспортного університету*. 2020. Вип. 45. С. 124–130.

24. ДСТУ ISO 9223:2017. Корозія металів і сплавів. Агресивність атмосфер. Класифікація, визначення та оцінка. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 24 с.

25. Мельник Р. Ф., Захарченко В. Г. Надійність і довговічність машинобудівних конструкцій в умовах корозійного впливу. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 185 с.

REFERENCES:

1. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024, December 27). *National transport strategy of Ukraine for the period until 2030* [Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku] (Resolution No. 1550). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n17>

2. Fomin, O. V., Burlutskiy, O. V., Kulbovskiy, I. I., & Veremeienko, L. A. (2025). Metodichni osnovy modeliuvannya ta otsinky nadiinosti nesuchykh system transportnykh zasobiv z urakhuvanniam yikh korozijnoi dehradatsii [Methodological foundations of modelling and reliability assessment of load-bearing systems of transport vehicles, taking into account their corrosive degradation]. *Municipal Economy of Cities. Series: Technical Sciences and Architecture*, (3), 597–605. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-597-605> [in Ukrainian]

3. Cui, C., Song, L., Liu, J., & Yu, Z. (2021). Corrosion-fatigue life prediction modeling for RC structures under coupled carbonation and repeated loading. *Mathematics*, 9(24), 3296. <https://doi.org/10.3390/math9243296>

4. Hrabová, K., Lehner, P., Ghosh, P., Konečný, P., & Teplý, B. (2021). Sustainability levels in comparison with mechanical properties and durability of pumice high-performance concrete. *Applied Sciences*, 11 (11), Article 4964. <https://doi.org/10.3390/app11114964>

5. Li, Q., Lan, J., Shen, L., Yang, J., Chen, C., Jiang, Z., & Wang, C. (2025, July). A state-of-the-art review on monitoring technology and characterization of reinforcement corrosion in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04780. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04780>

6. Jin, G., Jiang, Y., Tian, Y., et al. (2020). Design and application of MCD steel reinforcement corrosion detection apparatus. *Journal of Building Materials*, 23 (3), 733–738. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2020.03.035>

7. Sulim, A. O., Fomin, O. V., Khozya, P. O., & Mastepan, A. (2018). Teoretychne i praktychne vyznachennia parametriv bortovoi emnisnoi systemy nakopychennia enerhii pidzemnoi rukhomoho skladu [Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock]. *Scientific Bulletin of National Mining University*, (5), 79–87. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8> [in Ukrainian]

8. Wang, Y., Zhang, P., & Qin, G. (2021). Reliability assessment of pitting corrosion of pipeline under spatiotemporal earthquake including spatial-dependent corrosion growth. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.005>

9. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovsky, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Vyznachennia ratsionalnykh parametriv emnisnoi systemy nakopychennia enerhii dlia pidzemnoi zaliznychnoi rukhomoho skladu [Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1), 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080> [in Ukrainian]

10. Ferrarotti, A., Ghiggin, E. V., Rocca, R., et al. (2023). Simulation of corrosion phenomena in automotive components: A case study. *Materials*, 16(15), Article 5368. <https://doi.org/10.3390/ma16155368>

11. Tran, L., & Nguyen, T.-H. (2021). Effect of metal corrosion on the structural reliability of the 3D steel frames. In S.-I. Ao, H. R. Karimi, & L. G. Baciú (Eds.), *Advances in Engineering Research and Application: Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications, ICERA 2020* (pp. 39–44). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0053-1_5

12. Kawasaki, Y., Shiotani, T., & Ohtsu, M. (2013). Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 48, 1240–1247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.020>

13. Luo, Y., Zhang, C., & Liu, J. (2022). Identifying ship-wakes in a shallow estuary using machine learning. *Ocean Engineering*, 245, 110456. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110456>

14. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2019). Durability determination of the bearing structure of an open freight wagon body made of round pipes during its transportation on the railway ferry. *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, 21 (1), 28–34. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.1.28-34>
15. Melchers, R. E. (2003). Mathematical modelling of the diffusion phase of marine corrosion. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 125(4), 264–271. <https://doi.org/10.1115/1.1600467>
16. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, G., Kozarchuk, I., & Kharuta, V. (2019). Vyznachennia dynamichnoho navantazhennia na pivvahon pry yoho kriplenni v'iazkym z'iednanniam do paluby paroma [Determination of dynamic loading on a gondola car during its fastening by viscous connection to the ferry deck]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456>
17. Wang, J., & Zhang, R. (2020). Reliability-Based Optimization Design of Variable Cross-Section Component. *Corrosion Science*, 174, 108840. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108840>
18. Qu, C.-X., Jiang, J.-Z., Yi, T.-H., & Li, H.-N. (2024). Computer vision-based 3D coordinate acquisition of surface feature points of building structures. *Engineering Structures*, 300, 117212. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117212>
19. Sadeghian, M. (2022). The reliability assessment of a ship structure under corrosion and fatigue, using structural health monitoring. *International Journal of Engineering*, 35(9C), 1765–1778. <https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.09C.13>
20. Anofriiev, V. H., Doniev, O. A., Matsiuk, A. S., & Obertniak, S. M. (2012). Analiz vynyknennia nespravnostei ta znosu elementiv shvornevoi balky pivvahona [Analysis of malfunctions and wear of the pivot beam elements of a gondola car]. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, (41), 7–10.
21. Saprionova, S. Yu., Bulich, D. I., & Tkachenko, V. P. (2017). Prodovzhennia terminu ekspluatatsii vantazhnykh vahoniv [Extension of the service life of freight cars]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, (3), 179–182.
22. Pukhlyi, V. M., & Shevchenko, O. A. (2018). Diahnostyka tekhnichnoho stanu ta prohnozuvannia zalyshkovoho resursu metalovykh konstruksii transportnykh zasobiv [Diagnostics of the technical condition and forecasting of the residual resource of metal structures of vehicles]. NTU. K. 210 c. [in Ukrainian]
23. Kovalenko, V. S., & Bilonoh, O. M. (2020). Stratehii tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu mashyn na zasadakh nadiinosti [Strategies for maintenance and repair of machines based on reliability]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, (45), 124–130. [in Ukrainian]
24. DSTU ISO 9223:2017. (2017). Koroziiia metaliv i splaviv. Ahresyvnyist atmosfer. Klasyfikatsiia, vyznachennia ta otsinka [Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and assessment]. DP «UkrNDNTs». [in Ukrainian]
25. Melnyk, R. F., & Zakharchenko, V. H. (2019). Nadiinist i dovhovichnist mashynobudivnykh konstruksii v umovakh koroziiinoho vplyvu [Reliability and durability of mechanical engineering structures under corrosive conditions]. KhNUMH im. O. M. Beketova. 185 c. [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 30.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

ГІРНИЦТВО

УДК 628.511+622.4+62-784.43

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-18>

АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ ЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ СУМІСНОЇ РОБОТИ ПИЛОВЛОВЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМИ МІСЦЕВОГО ПРОВІТРЮВАННЯ У ГІРНИЧІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

Беднюк Олександр Вікторович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0009-0006-3346-9317

Чеберячко Іван Михайлович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-6193-5729

Крамаренко Нікіта Васильович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,

ORCID ID: 0009-0007-3387-4889

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

Левченко Костянтин Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0005-6490-8805

Болібрux Борис Васильович,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри цивільної безпеки

Національного університету «Львівська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-9879-7454

Зменшення запиленості рудникової атмосфери привибійного простору тупикових виробок за рахунок застосування обґрунтованих ефективних параметрів систем вентиляції і пиловловлювання при їх сумісній роботі

У роботі використано аналітичні методи для дослідження процесів аерології та пилової динаміки при сумісній роботі систем вентиляції і пиловловлювання. Встановлено, що при використанні сумісної роботи систем вентиляції і пиловловлювання виникають явища, які можуть призвести до значного зниження ефективності роботи цих систем, і зрештою до аварійних ситуацій, а також підвищити ризик виникнення професійних захворювань фіброгенної дії. На підставі виконаних досліджень розроблено матриці взаємного впливу систем вентиляції і пиловловлювання, що дозволяють визначити діапазон ефективності спільної роботи систем пиловловлювання та вентиляції тупикових гірничих виробок. Науково обґрунтовано фактори взаємного впливу процесів аерології та пилодинаміки, що визначають стан рудникової атмосфери та рівень безпеки у привибійному просторі тупикової виробки; показано, що цей вплив зумовлений параметрами вентиляційних потоків,

що залежать від продуктивності вентиляційного і пиловловлюючого обладнання. Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні розроблених матриць впливу сумісної роботи систем вентиляції і пиловловлювання для поліпшення санітарно-гігієнічних умов і підвищення рівня безпеки у привибійному просторі гірничих виробок при їх проведенні механізованим способом.

Ключові слова: пилоутворення, повітряні течії, відбійка гірських порід, умови праці, дрібнодисперсний пил.

Bedniuk Oleksandr, Cheberichko Ivan, Kramarenko Nikita, Maksymova Nataliia, Levchenko Kostiantyn, Bolibrukh Borys. Analysis of the Interaction of Linear Parameters in the Joint Operation of Dust Collection Devices and Local Ventilation System in Mining Industry

Reduction of dustiness in the mine atmosphere of the working face of dead-end workings through the use of reasonable and effective parameters of ventilation and dust collection systems when they work together.

The work uses analytical methods to study aerology and dust dynamics processes during the combined operation of ventilation and dust collection systems. It has been established that when ventilation and dust collection systems work together, phenomena occur that can significantly reduce the efficiency of these systems and ultimately lead to emergency situations, as well as increase the risk of occupational diseases of fibrogenic action. Based on the research, matrices of mutual influence of ventilation and dust collection systems have been developed, which allow determining the range of efficiency of the joint operation of dust collection and ventilation systems in dead-end mine workings. The factors of mutual influence of aerology and dust dynamics processes that determine the state of the mine atmosphere and the level of safety in the near-face space of a dead-end mine have been scientifically substantiated; it has been shown that this influence is determined by the parameters of ventilation flows, which depend on the performance of ventilation and dust collection equipment. The practical significance of the results obtained lies in the use of the developed matrices of the influence of the joint operation of ventilation and dust collection systems to improve sanitary and hygienic conditions and increase the level of safety in the working face of mine workings when they are carried out by mechanised means.

Key words: dust formation, air currents, rock breaking, working conditions, fine dust.

Вступ. Об'єктом дослідження є процеси аерології та пилодинаміки у привибійному просторі тупикових виробок при сумісному використанні систем місцевої вентиляції і пиловловлювання в умовах проходки гірничих виробок механізованим способом.

В даний час, проведення тупикових виробок пов'язане з високими темпами їх проходки, що потребує використання прохідницьких комбайнів високої продуктивності. У зв'язку з цим, очищення повітря, що виходить з привибійного простору тупикових виробок набуває великого значення, особливо при роботі комбайнів нового покоління. У цьому випадку утворюється велика кількість вуглепородного пилу, який виноситься із забою, осідає на поверхню виробки і гірниче обладнання, погіршуючи пиловибухобезпеку, а дрібнодисперсний розповсюджується по довжині виробки і далі по загальношахтній вентиляційній системі на поверхню, погіршуючи рудникову атмосферу та екологічну обстановку на поверхні.

Застосування сучасних заходів і засобів зменшення концентрації пилу, при інтенсивному руйнуванні масиву гірських порід, не забезпечує зниження запиленості до нормативних рівнів, що визначається величиною гранично допустимої концентрації. Це зумовлює необхідність подальшого вдосконалення систем знепилювання, контролю та управління процесами пилової динаміки.

При використанні сучасних систем пиловловлювання сумісно з місцевою системою

вентиляції, не враховується їх взаємний вплив, що може призвести до значного зниження ефективності їх роботи і зрештою до аварійних ситуацій, а також підвищити ризик виникнення професійних захворювань фіброгенної дії.

З метою наукового обґрунтування параметрів систем пиловловлювання і місцевої вентиляції при їх сумісній роботі в умовах проведення тупикових виробок механізованим способом, а також адаптації цих систем до сучасних способів і схем провітрювання з урахуванням пилової динаміки, у роботі поставлено завдання розробити спосіб визначення ефективних параметрів сумісної роботи цих систем для поліпшення санітарно-гігієнічних умов і підвищення рівня безпеки у привибійному просторі гірничих виробок при їх проведенні механізованим способом.

Дослідження процесів аерології та пилодинаміки у привибійному просторі тупикових виробок при їх проведенні механізованим способом, є основним завданням при обґрунтуванні ефективних засобів і заходів боротьби з пилом.

Створення ефективної системи для забезпечення умов праці гірників у привибійному просторі тупикових виробок згідно з нормативними актами, базується на виборі оптимальних рішень з сумісної роботи пиловловлювального та вентиляційного обладнання, його розташування відносно джерела пилоутворення.

Дослідженням з аерології та пилової динаміки в тупикових виробках присвячено багато наукових робіт [1-3]

Встановлено, що струмінь свіжого повітря, який подається у привибійний простір тупикової виробки, має максимальний динамічний тиск і відповідно найбільшу кінетичну енергію при виході його з нагнітального повітроводу [4], що призводить до значного впливу вказаних характеристик на роботу допоміжних засобів зниження запиленості. При подальшому русі по привибійному простору, швидкість і величина енергії повітряного потоку зменшуються. При цьому відбувається ефективне перемішування повітря у вибої з пилом, зниження його концентрації і винесення пилоповітряної суміші з вибою в результаті спільної дії конвективного переносу та турбулентної дифузії, що зумовлює діяльність вентиляції. Якщо вільний струмінь не досягає забою, то у привибійній зоні утворюється застійна зона, в якій концентрація пилу залишається високою. Вентиляція у цьому випадку є неефективною, тому що процес зниження концентрації пилу і винесення його з привибійної зони відбувається переважно під дією молекулярної дифузії, що обумовлює високий рівень запиленості на робочому місці машиніста комбайна.

Залежність дальності вентиляційного струменя у привибійному просторі від площі поперечного перерізу виробки виведена на основі формул [5,11].

Провітрювання привибійного простору тупикової виробки ускладнюється також наявністю у ньому руху одночасно двох повітряних потоків (свіжого і забрудненого) в протилежних напрямках. Потік свіжого повітря рухається у бік вибою, а забруднена пилометаноповітряна суміш рухається у бік гирла виробки. Характер їх поширення додатково залежить від зашарованості привибійного простору обладнанням, що сприяє формуванню застійних зон [6,11].

У зв'язку зі значним зростанням запиленості в механізованих прохідницьких вибоях в останній

час, широке застосування сумісно з нагнітальним провітрюванням знайшли локально встановлені пиловловлювальні системи [4-5]. Проте питання взаємного впливу систем пиловловлювання та місцевої вентиляції і явища, що пов'язані з цим впливом вивчені недостатньо, тому цей взаємний вплив не враховується при розрахунках. Нині ні методичними, ні нормативними документами не регламентовано параметри сумісної роботи таких систем.

Методи та методики дослідження. При застосуванні пиловловлювача можливо три варіанти провітрювання вибою:

1. продуктивність пиловловлювача менше від витрати повітря, що надходить у вибій (рисунк 1);
2. продуктивність пиловловлювача повітря дорівнює витраті повітря, що надходить у вибій (рисунк 2);
3. продуктивність пиловловлювача більше витрати повітря, що надходить у вибій (рисунк 3).

У варіанті 1 (рис. 1) пиловловлювач забирає частину повітря, що надходить по вентиляційному ставу в забій ($Q_{наг.}$) в зоні пилоутворення I, при цьому в перерізі комбайна (зона II), що становить приблизно половину перерізу виробки, швидкість повітря становить 0,25 м/с і більше, що відповідає вимогам нормативних документів забезпечення швидкості повітря в тупикових вибоях не менше 0,25 м/с [7]. Мінімальна швидкість в зоні II, як видно з рисунку 1, забезпечується за рахунок неочищеного повітря, що потрапляє далі у виробку в зону III, де змішується з очищеним, що виходить з патрубка пиловідділювача.

Даний варіант є прийнятним у частині організації провітрювання та розрідження метану, що виділяється у вибій під час гірничих робіт. При цьому за пиловим фактором цей варіант не є ефективним, тому що у цьому варіанті через пиловловлювач проходить і, отже, очищається частина запиленого

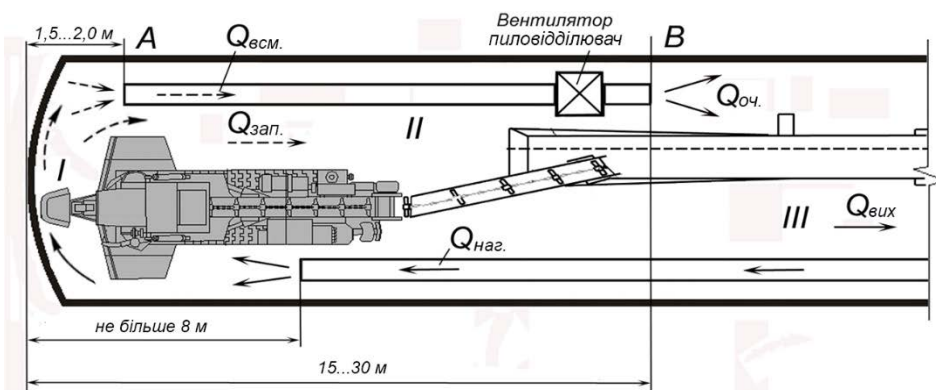


Рис. 1. Напрямок руху вентиляційних струменів при продуктивності пиловловлювача меншим, ніж витрата повітря, що подається у вибій

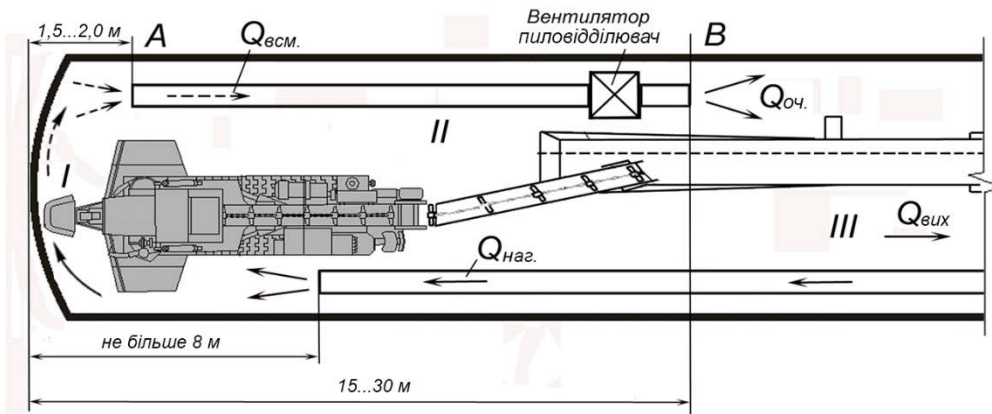


Рис. 2. Напрямок руху вентиляційних струменів при продуктивності пиловловлювача, що дорівнює витраті повітря, що подається у вибій

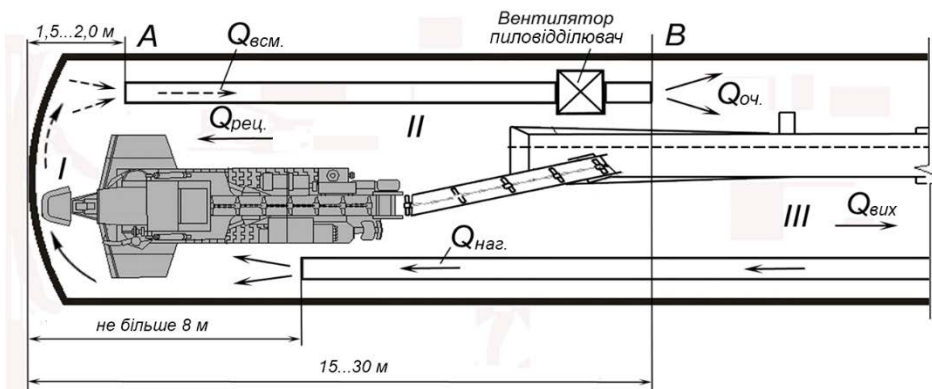


Рис. 3. Напрямок руху вентиляційних струменів при продуктивності пиловловлювача, що перевищує витрату повітря, що надходить у вибій

повітря. Навіть при заявленій 99% ефективності пиловловлювача з очищення повітря, що проходить через нього від пилу, в цілому по виробці зменшення кількості дрібнодисперсного пилу, що витає, складе не більше ніж 50%.

У варіанті 2 (рис. 2) за аналогією з варіантом 1 можна дійти невтішного висновку, що швидкість повітря у перерізі комбайна в зоні II становитиме від 0 до 0,25 м/с. У зв'язку з наближенням до нульової швидкості в перерізі комбайна можливе утворення застійних зон з підвищеною концентрацією метану (утворення місцевих, шарових скупчень) в зоні, де є електроенергія і відсутній контроль метану стаціонарними датчиками системи АГК. По пиловому чиннику можна дійти висновку, що ефективність очищення повітря від зваженого у ньому дрібнодисперсного пилу становитиме більше ніж у першому варіанті і може сягати до 99%.

У варіанті 3 у зв'язку з продуктивністю пиловловлювача, що перевищує витрату повітря, що надходить по вентиляційному ставу, буде відбуватися рециркуляція повітря у вибої в перерізі комбайна - між вибоєм і вихлопним патрубком

пиловловлювача в зоні II. У цьому випадку знепилювання повітря становитиме 100%, але за рахунок явища рециркуляції, у зоні II, може бути підвищеною концентрація метану.

На рисунку 4 наведена матриця взаємного впливу продуктивності пиловідсмоктувача і свіжого повітря, що надходить у вибій. У клітинках матриці наведена швидкість і напрямок вентиляційного струменя у привибійній зоні АВ при сумісній роботі вентиляційної системи і пиловідсмоктувача.

$Q_{\text{наг}}, \text{м}^3/\text{с}$						
Витрата повітря у вибої	8	0,71	0,57	0,43	0,28	0,14
	7	0,57	0,43	0,28	0,14	0,0
	6	0,43	0,28	0,14	0,0	-0,14
	5	0,28	0,14	0,0	-0,14	-0,28
	4	0,14	0,0	-0,14	-0,28	-0,43
	3	0,0	-0,14	-0,28	-0,43	-0,57
		Продуктивність пиловідсмоктувача				
		3	4	5	6	7 $Q_{\text{всм}}, \text{м}^3/\text{с}$

Рис. 4. Матриця впливу продуктивності пиловідсмоктувача на кількість повітря, що надходить у вибій

Значення швидкості повітря зі знаком «мінус» вказує на рециркуляцію повітря, що може спричинити накопичення метану до небезпечної кількості. Червона зона матриці вказує на недоцільне використання співвідношення витрати повітря у вибої та продуктивності пиловідсмоктувача з точки зору вимог безпеки. Жовта зона матриці вказує на неефективне використання співвідношення параметрів системи вентиляції і пиловідсмоктувача.

Таким чином, найбільш доцільним (і відповідним вимогам нормативних документів) є варіант, коли продуктивність пиловідсмоктування становитиме приблизно 50...75% від витрати повітря, що надходить у вибій (зелена зона матриці). При цьому застосування пиловідсмоктувача, встановленого у вибої, дозволить при організації провітрювання за першим варіантом забезпечити зниження запилення повітря в 2 рази, при забезпеченні заявленої ефективності пиловідсмоктування.

На рисунку 5 наведено матрицю взаємного впливу якості пилоочищення відпрацьованого повітря в прохідницькому вибої на продуктивність пиловідсмоктування та кількість повітря, що подається у вибій.

$Q_{\text{наг}}, \text{м}^3/\text{с}$						
Витрата повітря у вибої	8	38%	50%	63%	75%	88%
	7	43%	57%	71%	86%	100%
	6	50%	67%	83%	100%	100%
	5	60%	80%	100%	100%	100%
	4	75%	100%	100%	100%	100%
	3	100%	100%	100%	100%	100%
		3	4	5	6	7
		$Q_{\text{всм}}, \text{м}^3/\text{с}$				
		Продуктивність пиловідсмоктувача				

Рис. 5. Матриця взаємного впливу якості пилоочищення відпрацьованого повітря на продуктивність пиловідсмоктування та кількість повітря, що надходить у вибій

У зв'язку з цим постає питання про організацію як ефективного провітрювання, так і ефективного видалення пилу. Витрата повітря, що подається у вибій тупикової виробки, не повинна набагато перевищувати розрахункове повітря, необхідне для провітрювання, а продуктивність пиловловлювача повинна налаштуватися і складати близько 50% від витрати повітря, що подається у вибій.

У гірничих виробках з інтенсивним виділенням пилу, доцільно застосовувати схеми, які виключають потрапляння запиленого повітря на робочі місця. Локалізація джерел пилоутворення

в привибійному просторі, при використанні таких схем, досягається за рахунок розосередженої подачі повітря у вибій [8] (рис. 6).

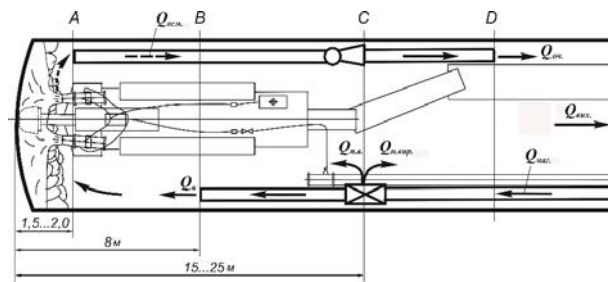


Рис. 6. Схема розосередженої подачі свіжого повітря у вибій: $Q_{\text{наг}}$ – витрата повітря, що подається у виробки по нагнітальному трубопроводу; $Q_{\text{всм}}$ – повітря, що відсмоктується пиловловлювальною установкою; $Q_{\text{в}}$ – повітря, що подається у вибій, $Q_{\text{п.в.}}$ – повітря, що подається для підсвіження в привибійну частину; $Q_{\text{п.вир.}}$ – подається для підсвіження повітря у виробі

Згідно з [5,9], привибійна частина виробки провітрюється вільним турбулентним струменем (25% від $Q_{\text{наг}}$), а частина повітря (75% від $Q_{\text{наг}}$) випускається через регульовані отвори в нагнітальному трубопроводі на відстані 15...25 м від вибою. Продуктивність пиловловлювальної установки складає 60...70% від $Q_{\text{наг}}$. Таким чином надлишок подачі становить 30...40%.

$Q_{\text{наг}}, \text{м}^3/\text{с}$						
Витрата повітря у вибої	8	0,14	0,29	0,43	0,57	0,71
	7	0,18	0,32	0,46	0,6	0,75
	6	0,21	0,36	0,5	0,64	-0,79
	5	0,25	0,39	0,54	-0,68	-0,82
	4	0,29	0,43	-0,57	-0,71	-0,86
	3	0,32	-0,46	-0,6	-0,75	-0,89
		3	4	5	6	7
		$Q_{\text{всм}}, \text{м}^3/\text{с}$				
		Продуктивність пиловідсмоктувача				

Рис. 7. Матриця впливу продуктивності пиловідсмоктувача на кількість повітря, що надходить у вибій при використанні схеми розосередженої подачі свіжого повітря у вибій

Із порівняння матриці, зображеної на рисунку 4 з матрицею на рисунку 7 видно, що застосування схеми розосередженої подачі свіжого повітря у вибій, значно покращує стан рудникової атмосфери на робочих місцях. Це пов'язано з тим, що при застосуванні такої схеми провітрювання,

створюється повітряна завіса за рахунок свіжого повітря, що надходить в виробку через бічний отвір в нагнітальному трубопроводі. Пристрій, що має бічний випуск повітря в виробку [10, 11], виконано у вигляді ланки труби довжиною ~ 1 м. У середині ланки розміщений шибер, що дозволяє ділити потік повітря, що набігає на дві нерівні частини, одна з яких проходить прямо по трубі і випускається поблизу вибою, а друга частина направляється через бокове вікно трубопроводу у виробку. Цей пристрій називається розподільником повітря або дільником потоку. Для підсвіження потоку повітря в перерізі B подача ВМП повинна бути на 30% більше. При розосередженому розподілі повітря гірники знаходяться на свіжому струмені. При цьому очищене повітря використовується раціонально, що важливо в умовах його дефіциту в протяжних тупикових виробках. У напрямку вибою переміщується потік повітря, що створює аеродинамічну завісу. При такій схемі руху повітря знижується пило-відкладення у виробці, що покращує ситуацію з пиловиховобезпекою. Крім того, за рахунок турбулізуючої дії свіжого струменя, що виходить з нагнітального трубопроводу в 8 м від забою, зменшується ймовірність утворення місцевих скупчень метану.

Для забезпечення максимальної ефективності даного способу за пиловим чинником необхідно, щоб продуктивність пиловловлювальної установки перевищувала витрату подаваного до забою повітря. У зоні A концентрація пилу збільшиться за рахунок надходження сюди пилового потоку. Для зменшення пилоутворення в зоні A можуть бути вжиті такі заходи як зниження швидкості обертання виконавчого органу, що призводить, в свою чергу, до меншого повторного дроблення і розкиду гірської маси. Крім того, збільшення швидкості руху повітря до 0,4...0,5 м/с приводить до зниження концентрації пилу в забої завдяки розрідженню пилової хмари. При збільшенні швидкості провітрювання до критичної (швидкість, при якій спостерігається явище здійсання осілого пилу), запиленість повітря підвищується.

Ефективність пиловловлювання в зоні роботи виконавчого органу комбайна (ділянка виробки AB) практично дорівнює нулю, про що свідчать розрахунки за виразом [8, 12-14]:

$$\eta = \frac{(k_{\kappa} - 1)\epsilon}{1 - \epsilon}$$

де k_{κ} – відношення концентрації пилу в повітрі яке відсмоктується до середньої концентрації пилу в перерізі повітрязабору (перетин A);
 ϵ – кратність відсмоктування.

Тому для зниження концентрації пилу в цій зоні необхідно застосовувати пилопригнічення піною.

Піна має значно більший обсяг, ніж рідина, з якої вона утворена. Це дозволяє збільшити поверхню взаємодії рідини з пилом, заповнити простір близько виконавчих органів виїмкових машин, екранувати джерело пилоутворення і перешкодити переходу пилу у зважений стан. Піна краще змочує пил, так як розчин піноутворювача в порівнянні з водою має більш низький поверхневий натяг, а тривалість взаємодії шару піни з запиленою поверхнею завжди більше часу контакту краплі розчину зі зваженими в повітрі порошинами. При нанесенні піни на запилену поверхню спостерігається її чистка за рахунок втягування пилинок всередину шару піни.

Розроблені матриці впливу дозволяють підібрати загальні співвідношення параметрів роботи системи пиловловлювача при застосуванні різних схем провітрювання привибійного простору. Для обліку можливих режимів провітрювання та роботи пиловловлювача необхідно розробити більш універсальний і складний спосіб обліку більшої кількості факторів, що впливають. Для цього можна використовувати системний підхід, що базується на тривимірному моделюванні. Для його застосування необхідно розробити критерії оцінки ефективності роботи систем пиловідсмоктувача з урахуванням організації провітрювання прохідницької ділянки.

Висновки. Розглянуто вплив роботи пиловловлювача на процес провітрювання. Встановлено, що при сумісній роботі систем пиловловлювання та вентиляції можуть виникати небезпечні явища: рециркуляція повітряних потоків та застійні зони з наближенням до нульової швидкості повітря, що сприяє підвищенню концентрації метану в місцях скупчення електрообладнання.

Розроблено матриці впливу сумісної роботи систем, що дозволяють визначити діапазон ефективності спільної роботи. Найбільш безпечним та доцільним є співвідношення, коли продуктивність пиловідсмоктування становить 50...75% від витрати повітря, що надходить у вибій при традиційній нагнітальній схемі.

Застосування схеми розосередженої подачі свіжого повітря у вибій значно покращує рудникову атмосферу на робочих місцях, створюючи аеродинамічну завісу і зменшуючи ризики, пов'язані з пиловиховобезпекою та місцевими скупченнями метану.

Для забезпечення максимальної ефективності знепилювання в особливо запилених

зонах (поблизу виконавчого органу комбайна) необхідно застосовувати додаткові заходи, зокрема пилопригнічення піною.

Для обліку всіх можливих режимів провітрювання та роботи пиловловлювача, а також для

точного визначення ефективних параметрів в умовах конкретної виробки, необхідно використовувати системний підхід, що базується на чисельному (тривимірному CFD) моделюванні аерологічних та пилодинамічних процесів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Batur M., Babii K. Spatial assessment of air pollution resulting from mining and industrial activities: The case of Kryvyi Rih, Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 970, Article 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>
2. Chernykh I. A., Lind E. V., Udaltsov E. A. Reducing worker exposure to dust in surface coal mining. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022. Vol. 3. P. 42–48. <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2022-3-42-48>.
3. Das M., Salinas V., LeBoeuf J., Khan R., Jacquez Q., Camacho A., Hovingh M., Zychowski K., Rezaee M., Roghanchi P., Rubasinghege G. A toxicological study of the respirable coal mine dust: assessment of different dust sources within the same mine. *Minerals*. 2023. Vol. 13, no. 3. Art. 433. <https://doi.org/10.3390/min13030433>.
4. Dong H. Research on dust generation mechanism and dust reduction of tidal shotcrete in underground coal mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 693, no. 1. Art. 012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/693/1/012081>.
5. Hajizadehmotlagh M., Fahimi D., Singhal A., Paprotny I. Wearable resonator-based respirable dust monitor for underground coal mines. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, no. 7. P. 6680–6687. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3241601>.
6. Liu C., Yin Z., He Y., Wang L. Climatology of dust aerosols over the Jiangnan Plain revealed with spaceborne instruments and MERRA-2 reanalysis data during 2006–2021. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 17. Art. 4414. <https://doi.org/10.3390/rs14174414>.
7. Mine dust. Dictionary geotechnical engineering. Springer, 2014. P. 871. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_131838.
8. Mukha O., Cheberiachko Y., Sotskov V., Kamulin A. Studying aerodynamic resistance of a stope involving CAD packages modeling. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 123. Art. 01048. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301048>.
9. Nascimento P., Taylor S. J., Arnott W. P., Kocsis K. C., Wang X. L., Firouzkouhi H. Development of a real time respirable coal dust and silica dust monitoring instrument based on photoacoustic spectroscopy. *Mine ventilation*. 2021. P. 233–241. <https://doi.org/10.1201/9781003188476-24>.
10. Otgonnasan A., Yundendorj G., Tsogtbayar O., Erdenechimeg Z., Ganbold T., Namsrai T., Damiran N., Erdenebayar E. Respirable dust and respirable crystalline silica concentration in workers of copper mine, Mongolia. *Occupational Diseases and Environmental Medicine*. 2022. Vol. 10, no. 3. P. 167–179. <https://doi.org/10.4236/odem.2022.103013>.
11. United States Department of Labor. Mine Safety and Health Administration. Respirable dust sampling requirements. Washington, 1994.
12. Wippich C., Breuer D., Rissler J., Koppisch D. Estimating respirable dust exposure from inhalable dust exposure. *Annals of Work Exposures and Health*. 2023. Vol. 67, Supplement 1. P. i20–i21. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac087.053>.
13. Wippich C., Rissler J., Koppisch D., Breuer D. Estimating respirable dust exposure from inhalable dust exposure. *Annals of Work Exposures and Health*. 2020. Vol. 64, no. 4. P. 430–444. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa016>.
14. Wu T., Yang Z., Wang A., Zhang K., Wang B. A study on movement characteristics and distribution law of dust particles in open-pit coal mine. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Art. 14631. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94131-6>.

REFERENCES:

1. Batur, M., & Babii, K. (2022). Spatial assessment of air pollution resulting from mining and industrial activities: The case of Kryvyi Rih, Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970, Article 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>
2. Chernykh, I. A., Lind, E. V., & Udaltsov, E. A. (2022). Reducing worker exposure to dust in surface coal mining. *Interexpo GEO-Siberia*, 3, 42–48. <https://doi.org/10.33764/2618-981x-2022-3-42-48>

3. Das, M., Salinas, V., LeBoeuf, J., Khan, R., Jacquez, Q., Camacho, A., Hovingh, M., Zychowski, K., Rezaee, M., Roghanchi, P., & Rubasinghege, G. (2023). A toxicological study of the respirable coal mine dust: Assessment of different dust sources within the same mine. *Minerals*, 13(3), Article 433. <https://doi.org/10.3390/min13030433>
4. Dong, H. (2021). Research on dust generation mechanism and dust reduction of tidal shotcrete in underground coal mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 693(1), Article 012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/693/1/012081>
5. Hajizadehmotlagh, M., Fahimi, D., Singhal, A., & Paprotny, I. (2023). Wearable resonator-based respirable dust monitor for underground coal mines. *IEEE Sensors Journal*, 23(7), 6680–6687. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3241601>
6. Liu, C., Yin, Z., He, Y., & Wang, L. (2022). Climatology of dust aerosols over the Jiangnan Plain revealed with space-borne instruments and MERRA-2 reanalysis data during 2006–2021. *Remote Sensing*, 14(17), Article 4414. <https://doi.org/10.3390/rs14174414>
7. Mine dust. (2014). In *Dictionary geotechnical engineering/Wörterbuch GeoTechnik* (p. 871). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_131838
8. Mukha, O., Cheberiachko, Y., Sotskov, V., & Kamulin, A. (2019). Studying aerodynamic resistance of a stope involving CAD packages modeling. *E3S Web of Conferences*, 123, Article 01048. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301048>
9. Nascimento, P., Taylor, S. J., Arnott, W. P., Kocsis, K. C., Wang, X. L., & Firouzkouhi, H. (2021). Development of a real time respirable coal dust and silica dust monitoring instrument based on photoacoustic spectroscopy. In *Mine ventilation* (pp. 233–241). <https://doi.org/10.1201/9781003188476-24>
10. Otgonnasan, A., Yundendorj, G., Tsogtbayar, O., Erdenechimeg, Z., Ganbold, T., Namsrai, T., Damiran, N., & Erdenebayar, E. (2022). Respirable dust and respirable crystalline silica concentration in workers of copper mine, Mongolia. *Occupational Diseases and Environmental Medicine*, 10(3), 167–179. <https://doi.org/10.4236/odem.2022.103013>
11. United States Department of Labor, Mine Safety and Health Administration. (1994). *Respirable dust sampling requirements*. U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration.
12. Wippich, C., Breuer, D., Rissler, J., & Koppisch, D. (2023). Estimating respirable dust exposure from inhalable dust exposure. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(Supplement_1), i20–i21. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac087.053>
13. Wippich, C., Rissler, J., Koppisch, D., & Breuer, D. (2020). Estimating respirable dust exposure from inhalable dust exposure. *Annals of Work Exposures and Health*, 64(4), 430–444. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa016>
14. Wu, T., Yang, Z., Wang, A., Zhang, K., & Wang, B. (2021). A study on movement characteristics and distribution law of dust particles in open-pit coal mine. *Scientific Reports*, 11, Article 14631. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94131-6>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 622.235:550.346:624.042.7

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-19>

РОЗРОБКА МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ НА БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ

Бойко Віктор Вікторович,

доктор технічних наук, професор,

завідувач Н-ДЛПСБТВ

Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0003-3443-1688

Ган Анатолій Леонідович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри геоінженерії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

старший науковий співробітник Н-ДЛПСБТВ

Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0003-0832-1338

Хлевнюк Тамара Вікторівна,

кандидат технічних наук,

старший науковий співробітник Н-ДЛПСБТВ

Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0001-8024-1864

Ган Олена Валеріївна,

кандидат технічних наук,

старший викладач кафедри геоінженерії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

старший науковий співробітник Н-ДЛПСБТВ

Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0003-0739-9600

У статті запропоновано сучасний експериментальний метод щодо ідентифікації сейсмічних хвиль, які впливають на будівлі та споруди під час техногенних вибухів, пов'язаних з вибуховими речовинами їх виготовленням і використанням при проведенні вибухових робіт на кар'єрах та воєнних вибухів. Метод базується на аналізі часових та частотних характеристик фрагментів сейсмограм, що дає змогу з високою точністю розмежовувати об'ємні (поздовжні та поперечні) й поверхневі хвилі з небезпечними показниками для відповідних будівель і споруд, зокрема при збігу та накладанні власних параметрів коливань, здатних викликати резонансні явища, зниження несучої здатності конструкцій та небезпечні деформації інженерних об'єктів. Установлено чіткі частотні критерії розмежування об'ємних та поверхневих хвиль, які свідчать, що об'ємні хвилі характеризуються частотами понад 20 Гц, поверхневі хвилі – частотами до 20 Гц. Розроблено послідовність спектрального аналізу різних часових фрагментів для уточнення часових границь між різними типами хвиль.

На основі часових, частотних та амплітудних критеріїв розроблено алгоритм ідентифікації сейсмічних хвиль, який містить визначення швидкостей Р- та S-хвиль, виділення часових фрагментів записів та спектральний аналіз домінантних частот. Апробація методу проведена при виконанні вибухових робіт на Демне-Добрянському кар'єрі, за допомогою якого встановлено часові границі приходу різних хвиль та відокремлені фрагменти з потенційно небезпечними параметрами. Запропонований метод може застосовуватися як для моніторингу споруд, визначення технічного стану, так і для оцінки екологічних ризиків, пов'язаних із сейсмічним впливом вибухів.

Розроблений метод дає змогу фіксувати фрагменти сейсмограми з частотами, близькими до власних коливань охоронного об'єкта, виявляти максимальні швидкості коливань для кожного типу хвиль окремо та прогнозувати найбільш небезпечні фази сейсмічного впливу.

Ключові слова: сейсмічні хвилі, спектральний аналіз, сейсмостійкість, вибухові впливи, кар'єр, моніторинг будівель та споруд, екологічна безпека.

Boiko Viktor, Han Anatolii, Khlevnyk Tamara, Han Olena. Development of a method for identifying seismic waves affecting buildings and structures

The article proposes a modern experimental method for identifying seismic waves affecting buildings and structures during man-made explosions associated with explosives, their manufacture and use blasting methods in open-pit mine and military explosions. The method is based on analysing the time and frequency characteristics of seismogram fragments, which enables high-precision differentiation between body waves (longitudinal and transverse) and surface waves with potentially dangerous parameters for engineering structures. Such parameters become critical when the natural vibration frequencies of buildings coincide or overlap with the dominant frequencies of the waves, which may cause resonance phenomena, reduce structural bearing capacity, and lead to hazardous deformations. Clear frequency criteria for distinguishing body and surface waves have been established: body waves are characterized by frequencies above 20 Hz, while surface waves exhibit frequencies below 20 Hz. A sequential spectral analysis of time-separated fragments has been developed to refine the temporal boundaries between different wave types.

Based on time-, frequency- and amplitude-based criteria, an algorithm for seismic wave identification has been developed. It includes determining the velocities of P- and S-waves, isolating time fragments of the recorded signal, and performing spectral analysis of dominant frequencies. The method was tested during blasting operations at the Demne-Dobryansky open-pit mine, allowing the determination of arrival times for different types of waves and the identification of fragments with potentially dangerous characteristics. The proposed method can be applied both to structural monitoring and technical condition assessment, as well as to evaluating environmental risks associated with the seismic impact of explosions.

The developed approach also makes it possible to detect seismogram fragments with frequencies close to the natural oscillations of the protected object, record maximum vibration velocities for each type of wave, and predict the most hazardous phases of seismic action.

Key words: seismic waves, spectral analysis, seismic resistance, explosion impact, open-pit mine, structural monitoring, environmental safety.

Вступ. Моніторинг технічного стану будівель і споруд за їх динамічними характеристиками посідає важливе місце серед сучасних методів діагностики та отримує дедалі більше поширення як у світовій, так й у вітчизняній практиці. Знання параметрів власних форм коливань конструкцій є необхідною умовою при визначенні їх сейсмостійкості. Вимоги щодо натурного визначення цих параметрів для споруд, які перебувають у сейсмічних зонах, закладено в державних нормах України ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України» [1].

Застосування вибухових технологій у геоінженерії при розмінуванні територій, проведенні об'ємних вибухів, ущільненні ґрунтового масиву під забудову, злітних смуг на польових летовищах а також вибухи, спричинені ураженням різних типів ракет та снарядів, суттєво впливають на технічний стан наявних будівель та споруд [2–5]. Такі хвильові збурення характеризуються повторюваністю та періодичністю, що може спричинити утворення резонансних явищ, які також можуть суттєво знизити несучу здатність конструкцій [6].

Особливу увагу слід приділити вивченню взаємодії поздовжніх (P), поперечних (S) та поверхневих (R) хвиль у різних типах ґрунтів, а також дослідженню механізмів їх поширення під час техногенних впливів від таких вибухів. Відомо, що саме частотні та часові параметри коливань є ключовими індикаторами потенційної небезпеки для конструкцій, що можуть спричинити втрату їх несучої здатності та розвиток деформацій.

Визначення фактичних частот, форм та декрементів власних форм коливань будівель і споруд є одним з основних параметрів при впливі на них динамічних навантажень від техногенних вибухів цивільного та воєнного характерів. Особливу актуальність це питання набуває при вибухах поблизу об'єктів інфраструктури, де необхідно контролювати вплив сейсмічних хвиль на будівлі та споруди.

Важливим додатковим аспектом при аналізі сейсмічних коливань, спричинених техногенними та воєнними вибухами, є їх вплив на навколишнє природне середовище. Повторювані хвильові збурення можуть призводити до зміни напружено-деформованого стану ґрунтового масиву, порушення структурно-механічних властивостей порід і формування тріщинуватості, що знижує стійкість геологічного середовища. У районах з розвиненими водоносними горизонтами вібраційні навантаження здатні спричиняти перерозподіл підземних вод, локальну фільтрацію або зсуви дрібнодисперсних частинок. Це, своєю чергою, може впливати на якість підземних вод та прискорювати процеси ерозії. Для територій із чутливими екосистемами характерними є додаткові ризики, зокрема порушення середовища існування фауни, зміна міграційних шляхів та акустичний стрес для живих організмів. Урахування екологічних наслідків є необхідною умовою комплексної оцінки безпеки вибухових робіт і визначення допустимих параметрів сейсмічних впливів на прилеглі природні системи.

Постановка проблеми. При проведенні вибухових робіт на гірничих підприємствах, що розташовані поблизу або в межах населених пунктів, зазнають систематичного динамічного впливу прилеглих будівлі та споруди.

Під час аналізу отриманих результатів промислових вибухів основна увага зазвичай приділяється поверхневим хвилям, оскільки вони мають більші періоди і часто більші амплітуди ніж об'ємні хвилі, які й створюють значну небезпеку для охоронних об'єктів. Крім того, об'ємні хвилі також можуть становити серйозну загрозу, особливо коли вони спричиняють резонансні явища в конструкціях будівель і споруд.

Класичні методи визначення форм власних коливань шляхом вимірювання амплітуд вільних або вимушених коливань не дають результату бажаної точності, особливо при згущенні власних частот. Для визначення зміни форми коливання необхідно виконувати вимірювання прогинів розмірністю 0,001 мм та менше, що практично реалізується дуже складно і при значних похибках.

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування методу ідентифікації сейсмічних хвиль для визначення небезпечних часових і частотних характеристик на будівлі і споруди за результатами моніторингу техногенних вибухів.

Основним завданням при оцінці впливу сейсмічних коливань на будівлі та споруди є необхідність точної ідентифікації поздовжніх (Р-хвиль), поперечних (S-хвиль) та поверхневих (R-хвиль) компонентів у загальній сейсмограмі для визначення фрагментів з небезпечними часовими й частотними характеристиками.

Методи та методики дослідження. Комплексне поєднання: експериментального дослідження параметрів за допомогою апаратурних приладів щодо реєстрації сейсмічних та ударно-повітряних хвиль техногенних вибухів; використання графоаналітичного методу та методу математичної статистики при обробці експериментальних даних; з теоретичних методів використано логічний, гіпотетичний, натурного моделювання, розрахунково-й графо-аналітичний, а також метод математичної статистики.

Результати дослідження. На осцилограмі сейсмоколивань (залежність швидкості коливань частинок середовища від часу) послідовно фіксують такі типи сейсмічних хвиль з характеристиками:

- поздовжня хвиля (Р-хвиля) зі швидкістю V_p ;
- поперечна хвиля (S-хвиля) зі швидкістю V_s ;
- поверхнева хвиля (R-хвиля) зі швидкістю V_r .

Швидкості цих хвиль пов'язані такими співвідношеннями:

$$V_p = k_1 \cdot V_s \quad (1)$$

$$V_r = k_2 \cdot V_s \quad (2)$$

де k_1 , k_2 – коефіцієнти, які залежать від типу порід: $k_1 = 1,4 \div 1,5$ – для осадових порід, $k_1 = 1,7 \div 1,9$ – для вивержених та метаморфічних порід, $k_2 = 0,9184$ (теоретичне значення).

Ці швидкості залежать від модуля пружності середовища E , коефіцієнта Пуассона ν , модуля зсуву G та щільності ґрунту ρ .

На практиці ґрунтовий масив є неоднорідним, анізотропним, має тріщини та інші дефекти, що ускладнює ідентифікацію окремих типів хвиль. У результаті вимірювань на сейсмограмі (спектрограмі) отримуємо повну характеристику розповсюдження всіх сейсмічних коливань залежно від відстані до джерела збудження (вибуху).

Для апробації запропонованого методу проведено дослідження ідентифікації сейсмічних хвиль на будівлі та споруди на прикладі вибуху в Демне-Добрянському кар'єрі, параметри якого наведено в таблиці 1. Для цього на різних відстанях від джерела збудження (вибуху блока) розташовані датчики. Схему розташування та параметри датчиків наведено на рис. 1 та табл. 2.

Таблиця 1
Основні показники масового вибуху

Показники	Демне-Добрянський кар'єр блок № 29, гор. +76,5
Діаметр свердловини, мм	180
Кількість свердловин	57
Сітка свердловин, м	4,3 x 4,3
Глибина свердловини, м	14,0–16,3
Забивка, м	4,3–4,5
Перебур, м	0,5–1,0
Довжина заряду, м	10,2–12,0
Типи вибухових матеріалів	Анемікс
Q_L – погонна маса ВР свердловинного заряду, кг/м	28
Маса заряду в одній свердловині, кг	285–330
Питомі витрати ВР, кг/м ³ , q	1,15
Щільність ВР, г/см ³ , γ	1,18–1,21
Загальна маса зарядів, кг	16325
Об'єм серії, м ³	14428
Система ініціювання	НСІ
Схема КСП	Діагонально врубів
Кількість ступенів сповільнення	51
Інтервал сповільнення, мс	42*25
Маса заряду в максимальній групі, кг	755
Час ініціювання всього блоку, мс	621 + 200
Відношення загальної маси зарядів до часу ініціювання блоку, кг/мс	19,88

Для реєстрації розповсюдження сейсмічних хвиль застосовували сейсмовимірювальний комплекс, який містить стандартні однокомпонентні електромагнітні датчики СМ-2, СМ-3 та СМ-3В (табл. 2), швидкісний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) Е14-440 та персональний комп'ютер (notebook) для запису та обробки даних.

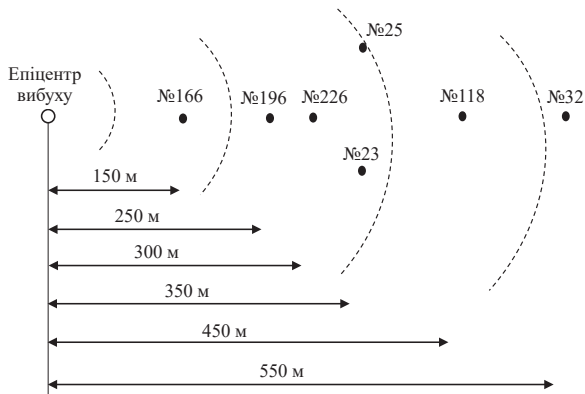


Рис. 1. Схема розташування датчиків вимірювання сейсмічних коливань

Для реєстрації сейсмічних коливань датчики СМ-3 установлювались у вертикальному положенні на поверхні ґрунту за умови жорсткого контакту (заглиблені в ґрунт). З підходом сейсмічної хвилі до поверхні ґрунт починає переміщуватися. Разом із ґрунтом зміщується постійний магніт, жорстко зв'язаний з корпусом сейсмоприймача. Інертна маса (індукційна котушка, закріплена на пружинах) деякий час через інерцію залишається у фіксованому положенні. При цьому витки котушки індуктивності перетинають поле постійного магніту з магнітним потоком Φ та індукцією B , завдяки чому виникає електрорушійна сила E . Частота електрорушійної сили відповідає частоті коливання

сейсмічної хвилі, а амплітуда E пропорційна амплітуді коливань цієї хвилі. Далі електричні сигнали подають на персональний комп'ютер (ПК) через 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) фірми L-Card.

Схема розташування датчиків та система вимірювань були такими: перший датчик СМ-3 № 166 (канал 1) розташований на відстані 150 м від джерела збудження (блоку підривання) та реєстрував вертикальний (Z) складник сейсмічних коливань; другий датчик СМ-3 № 196 (канал 2) розташований на відстані 250 м (100 м від попереднього), реєстрував вертикальний (Z) складник; третій датчик СМ-2 № 226 (канал 3) – на відстані 300 м (50 м від попереднього), реєстрував вертикальний (Z) складник; четвертий та п'ятий датчики СМ-3В №25 та №23 (канали 4, 6) – на відстані 350 м, реєстрували горизонтальні складники (X) та (Y) сейсмічних коливань; шостий датчик СМ-3 № 118 (канал 7) – на відстані 450 м, реєстрував вертикальний (Z) складник; сьомий датчик СМ-3В № 32 (канал 8) – на відстані 550 м, реєстрував теж вертикальний (Z) складник сейсмічних коливань.

Приклади отриманих осцилограм у результаті проведених експериментальних вимірювань на Демне-Добрянському кар'єрі по Z-складникам короткоуповільненого вибуху наведено на Рис. 2, а на проміжку часу від 0 до 0,4 с – на Рис. 3.

Розроблена методика ідентифікації хвиль передбачає таку послідовність. Спочатку, на першому етапі, визначається швидкість позовжньої хвилі V_p . За характерними точками на сейсмограмі визначається час проходження позовжньої хвилі між двома такими датчиками (наприклад, від датчика № 166 до датчика № 196 на відстані 100 м). Знаючи відстань між датчиками та час розповсюдження хвилі, вираховується швидкість V_p . За відомою відстанню

Таблиця 2

Параметри датчиків для реєстрації сейсмічних хвиль

№ з/п	Тип датчика	Номер датчика	Номер каналу	Власна частота, Гц	Ступінь затушення	Коефіцієнт перетворення, В/(м/с)	Маса, кг	Відстань до вибуху, м	Складник хвилі
1	СМ-3	166	1	20	0,55	18	0,22	150	Z
2	СМ-3	196	2	20	0,55	18	0,22	250	Z
3	СМ-2	226	3	20	0,55	18	0,22	300	Z
4	СМ-3В	25	4	20	0,55	18	0,22	350	X, Y
5	СМ-3В	23	6	20	0,55	18	0,22	350	X, Y
6	СМ-3	118	7	20	0,55	18	0,22	450	Z
7	СМ-3В	32	8	20	0,55	18	0,22	550	Z

між джерелом збудження (блоком підривання) та першим датчиком визначається точка вибуху по часовій осі.

Потім, на другому етапі, виконується розрахунок приблизного часу приходу поперечної хвилі V_s за формулою (1) залежно від типу порід та приблизний час її приходу до першого датчика.

І в кінці, на третьому етапі, виконується спектральний аналіз фрагментів сейсмограми, а саме послідовний спектральний аналіз різних часових фрагментів запису для точної ідентифікації типів хвиль за їх частотними характеристиками.

Наведемо отримані результати досліджень запропонованої методики ідентифікації сейсмічних хвиль на будівлі та споруди на прикладі вибуху в Демне-Добрянському кар'єрі. Отримані фрагменти осцилограм: перший фрагмент – зона позовдвжньої хвилі (рис. 4); другий

фрагмент – перехідна зона (рис. 5); третій фрагмент – зона без позовдвжньої хвилі (рис. 6); четвертий фрагмент – пізніші фази сейсмічних коливань (рис. 7); повний сигнал від датчику № 166 (рис. 8).

Виокремимо ще декілька зон, щоб перевірити, чи правильно ми знайшли час вступу поперечної хвилі. Візьмемо ще один період коливань (рис. 5).

Виберемо зону без першого періоду, тобто без великого складника позовдвжньої хвилі (рис. 6).

Наступний фрагмент із запису не має фрагмента № 2 (рис. 7).

Наостанок візьмемо спектр з усього сигналу від сенсора № 166, тобто з каналу № 1 (див. рис. 8).

На спектрограмах рис. 7б і 8б переважають частоти до 20 Гц, тоді як на осцилограмах рис. 4б, 5б і 6б переважають частоти понад 20 Гц.

Перший фрагмент (рис. 4) містить період від приходу позовдвжньої хвилі до очікуваного

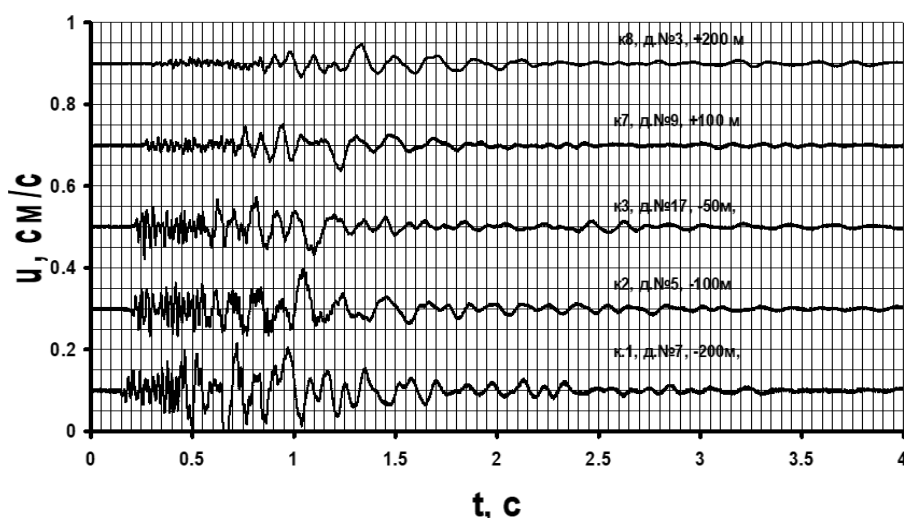


Рис. 2. Осцилограма по Z-складникам короткостовільного вибуху на Демне-Добрянському кар'єрі

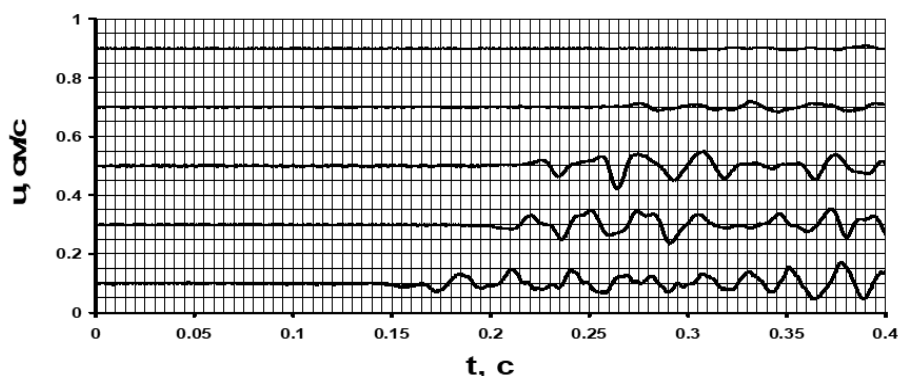


Рис. 3. Фрагмент осцилограми рис. 1 короткостовільного вибуху на Демне-Добрянському кар'єрі до часу 0,4 с

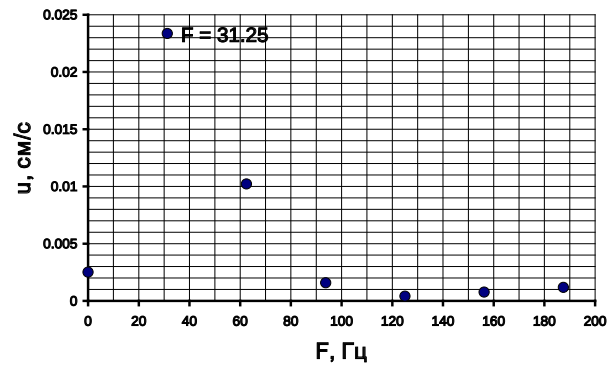
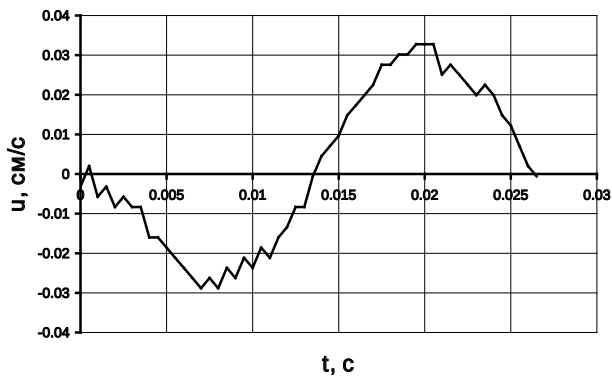


Рис. 4. Перший фрагмент запису: а – часова залежність, б – частотна

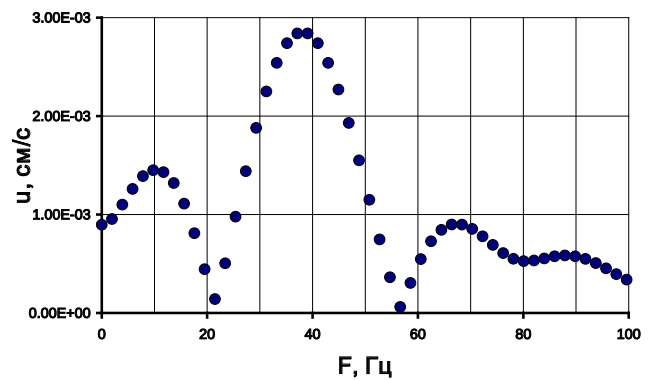
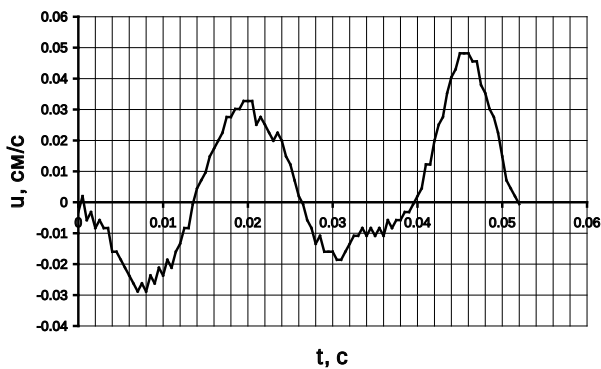


Рис. 5. Другий фрагмент запису: а – часова залежність, б – частотна

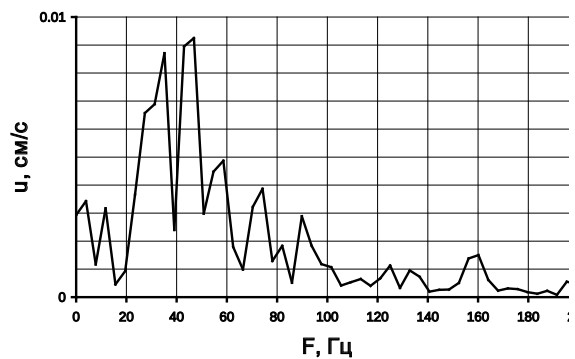
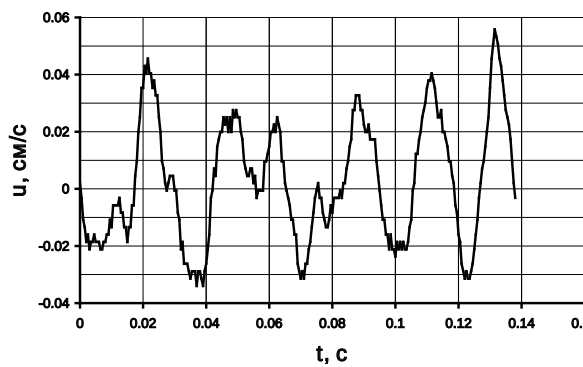


Рис. 6. Фрагмент № 3: а – часова залежність, б – частотна

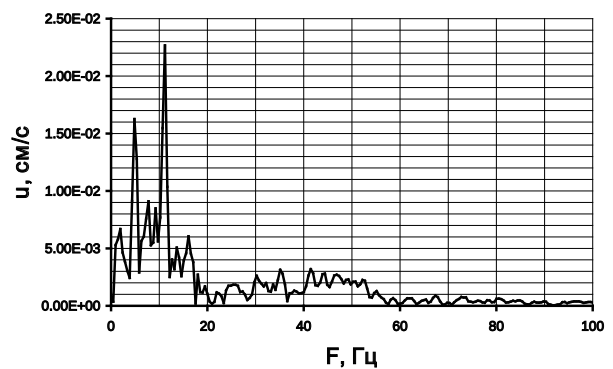
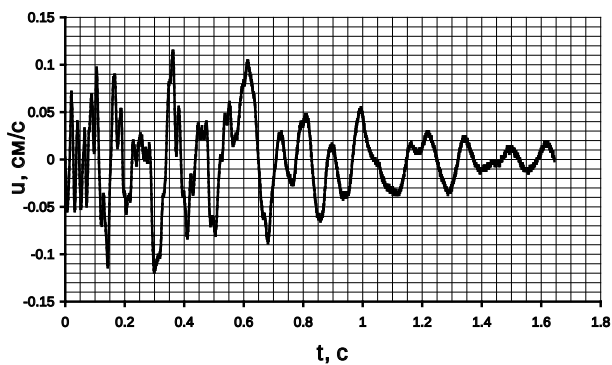
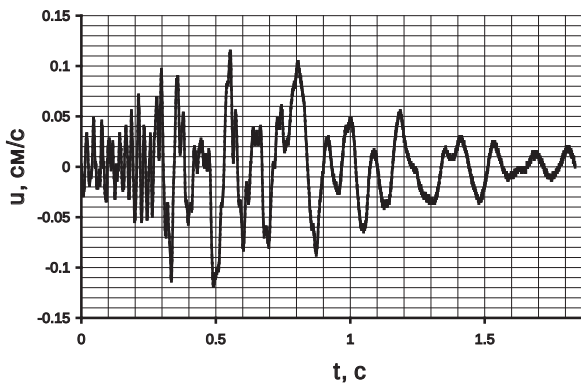
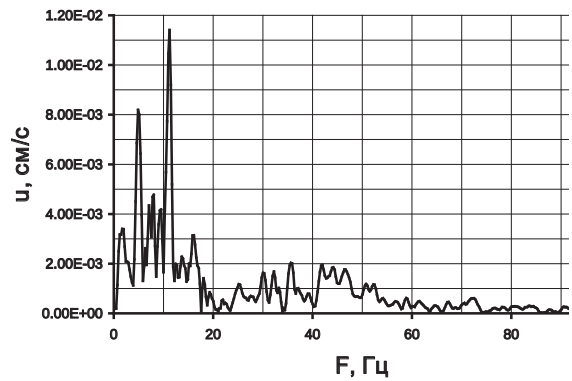


Рис. 7. Фрагмент №4: а – часова залежність, б – частотна



а



б

Рис. 8. Сигнал із сенсора № 166: а – часова залежність, б – частотна

приходу поперечної хвилі. Спектральний аналіз цього фрагмента показав доміную частоту 31,25 Гц, яка є характерною для поздовжньої хвилі в цих умовах. Ця частота слугує «паспортом» поздовжньої хвилі для подальшої ідентифікації.

Другий фрагмент (Рис. 5), що містить додатковий період коливань, дає змогу верифікувати правильність визначення часу вступу поперечної хвилі. Спектральний аналіз підтвердив присутність частот понад 20 Гц, характерних для об'ємних хвиль.

Третій фрагмент (Рис. 6) без першого періоду (без великого складника поздовжньої хвилі) також демонструє перевагу частот понад 20 Гц, що підтверджує присутність поперечних хвиль.

Четвертий фрагмент (Рис. 7). Спектральний аналіз пізніх фрагментів показав зміну частотного складу з перевагою частот до 20 Гц, що свідчить про домінування поверхневих хвиль.

Спектральний аналіз усього (повного) сигналу (Рис. 8) від датчика № 166 продемонстрував перевагу низьких частот (до 20 Гц) через значний вклад поверхневих хвиль у загальну картину сейсмічних коливань.

На основі проведених досліджень встановлено часові, частотні та амплітудні критерії ідентифікації сейсмічних коливань.

Часові критерії – враховують послідовність приходу хвиль, а саме: Р-хвиля → S-хвиля → R-хвиля. Причому різниця в часі приходу між типами хвиль відповідає розрахунком швидкостям

Частотні критерії – об'ємні хвилі (Р та S): домінуючі частоти > 20 Гц (25–35 Гц); поверхневі хвилі (R): домінуючі частоти < 20 Гц; можливість виділення часових границь зміни частотного спектра.

Амплітудні критерії – поверхневі хвилі характеризуються відносно більшими амплітудами; поздовжні хвилі мають характерні імпульсні форми на початку запису.

Запропонований метод ідентифікації сейсмічних хвиль на будівлі та споруди містить алгоритм, наведений на рис. 9.

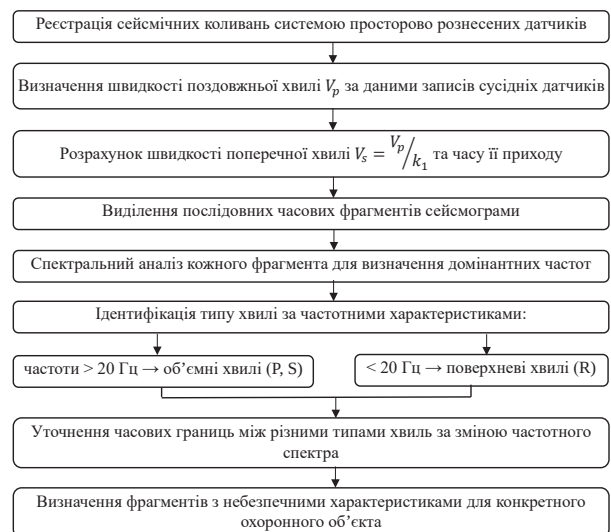


Рис. 9. Алгоритм ідентифікації сейсмічних коливань на будівлі та споруди

За проведеною ідентифікацією сейсмічних коливань можна оцінити ступінь небезпеки для будівель та споруд за такими факторами:

- можливість утворення резонансних явищ, якщо домінуючі частоти хвиль збігаються з власними частотами конструкцій;
- перевищення допустимих швидкостей за амплітудою коливань;
- за типом хвиль: об'ємні хвилі небезпечні при резонансних явищах, поверхневі хвилі – при значних амплітудах.

За допомогою запропонованої методики можна: виявляти фрагменти сейсмограм з частотами, близькими до власних частот охоронного об'єкта; оцінювати максимальні швидкості коливань для кожного типу хвиль окремо; прогнозувати найбільш небезпечні фази сейсмічного впливу; оптимізувати параметри короткоуповільненого підривання для зменшення негативного впливу.

Висновки

1. Розроблено метод ідентифікації сейсмоакустичних хвиль, що базується на поєднанні часових та частотних характеристик фрагментів сейсмограм.

2. Метод дає змогу виконувати точну ідентифікацію об'єктних (поздовжніх та поперечних) і поверхневих хвиль за їх частотними характеристиками.

3. Установлено чіткі частотні критерії розмежування: об'єктні хвилі характеризуються

частотами понад 20 Гц, поверхневі хвилі – частотами до 20 Гц.

4. Показано можливість послідовного спектрального аналізу різних часових фрагментів для уточнення часових границь між різними типами хвиль.

5. Метод дає змогу виявляти фрагменти сейсмограм з небезпечними часовими та частотними характеристиками для конкретних будівель і споруд.

6. Розроблена методика може бути використана для оптимізації параметрів короткоуповільненого підривання з метою зменшення сейсмічного впливу на об'єкти інфраструктури.

7. Подальший розвиток методу передбачає створення автоматизованої системи ідентифікації хвиль у режимі реального часу та формування рекомендацій щодо захисту будівель і споруд.

ЛІТЕРАТУРА:

- ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. На заміну ДБН В.1.1-12:2006; чинний від 2014-10-01. Вид. офіц. 2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58628 (дата звернення: 17.11.2025).
- Бойко В. В. Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України. Київ : ТОВ «Вид-во Сталь», 2012. 234 с.
- Бойко В. В., Ган А. Л., Ган О. Спеціальні вибухові технології в геоінженерії : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 316 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49097> (дата звернення: 10.11.2025).
- Boiko V., Han A., Khlevnyuk T., Zagoruyko E., Han O., Zakusylo R. Impact of Seismic and Air-Blast Waves Caused by Civilian and Military Explosions on Critical Infrastructure Facilities. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2024. № 21(4). P. 410–428. <https://doi.org/10.22211/cejem/199328>
- Бойко В. В., Ган А. Л., Хлевнюк Т. В., Загоруйко Є. А., Ган О. В., Дубовик В. Г. Оцінка напружено-деформованого стану схилів зсувонебезпечних територій на яких розташовані об'єкти критичної інфраструктури. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. № 77. С. 7–17. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.007>
- Бойко В. В., Войтенко Ю. І., Ган А. Л., Хлевнюк Т. В., Загоруйко Є. А., Ган О. В. Оцінка сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням їх власної гармоніки у вибуховому спектрі цивільного і воєнного характерів. *Технічна інженерія*. 2024. 1(93). С. 308–315. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-308-315](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-308-315).

REFERENCES:

- State Building Codes of Ukraine. (2014). Budivnytstvo v seismichnykh raionakh Ukrainy [Construction in seismic areas of Ukraine] (DBN V.1.1-12:2014). (replaces DBN V.1.1-12:2006; effective from October 1, 2014). Official publication. Retrieved November 17, 2025. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58628 [in Ukrainian].
- Boiko, V. V. (2012). Problemy seismichnoi bezpeky vybukhovoi spravy u kar'ierakh Ukrainy [Problems of seismic safety of blasting operations in the Ukrainian open-pit mine] Kyiv: Steel Publishing House LLC, 234 p. [in Ukrainian].
- Boiko, V. V., Han, A. L., & Han, O. V. (2022). Spetsialni vybukhovі tekhnolohii v heoіnzhenerii: monohrafiia [Special Explosive Technologies in Geoengineering: Monograph]. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49097> [in Ukrainian].
- Boiko, V., Han, A., Khlevnyuk, T., Zagoruyko, E., Han, O., & Zakusylo, R. (2024). Impact of Seismic and Air-Blast Waves Caused by Civilian and Military Explosions on Critical Infrastructure Facilities. *Central European Journal of Energetic Materials*, 21(4), 410–428. <https://doi.org/10.22211/cejem/199328>
- Boiko, V., Han, A., Khlevnyuk, T., Zagoruyko, E., Han, O., & Dubovyk, V. (2024). Otsinka napruzhenodeformovanoho stanu skhyliv zsuvo nebezpechnykh terytorii na yakykh roztashovani obiekty krytychnoi infrastruktury [Assessment of the stress-strain state of slopes in landslide-prone areas where critical infrastructure facilities are located]. *Collection of research papers of the National Mining University*, 77, 7–17. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.007> [in Ukrainian].
- Boiko, V., Voitenko, Y., Han, A., Khlevniuk, T., Zahoruiko, Y., & Han, O. (2024). Otsinka seismostiikosti obiektiv krytychnoi infrastruktury z urakhuvanniam yikh vlasnoi harmoniky u vybukhovomu spektri tsyvilnoho i voiennoho kharakteriv [Assessment of earthquake resistance of critical infrastructure objects, taking into account their own harmonics in the explosive spectrum of civil and military characters]. *Technical Engineering*, 1(93), 308–315. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-308-315](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-308-315) [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 19.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 622.271

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-20>

АДАПТИВНА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ГІРНИЧИХ РОБІТ ГІРНИЧО-ВИДОБУВНОГО КЛАСТЕРА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕВРИСТИЧНОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ

Григор'єв Юліан Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри відкритих гірничих робіт
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-1780-5759

Луценко Сергій Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри відкритих гірничих робіт
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-5992-3622

Григор'єв Ігор Євгенійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0009-0006-2787-106X

Пилипчук Давид Ігорович,

аспірант
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0009-0000-9719-286X

Лебеденко Володимир Володимирович,

аспірант
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0009-0006-4185-4098

Роботу присвячено науковому обґрунтуванню та формалізації підходу до визначення режиму гірничих робіт на рівні гірничодобувного кластера, що об'єднує кілька кар'єрів і техногенні родовища. Вихідною передумовою є необхідність стабілізувати подання на збагачувальну фабрику рудної шихти за обсягом і вмістом за умов просторової варіабельності руд, динамічного бортового вмісту та зміни зовнішніх чинників.

Виконаний у роботі аналіз літературних джерел підтвердив еволюцію від детермінованих контурних і календарних підходів до постановок, що враховують невизначеність параметрів родовища та вимоги стабілізації рудної шихти. Результати аналізу обґрунтовують вибір еволюційних методів як базової обчислювальної парадигми для пошуку стійких рішень у дискретному, багатокритеріальному та жорстко обмеженому просторі задачі. Запропоновано математичну постановку розв'язання такої задачі, у якій цільова функція мінімізує сукупні витрати на виймання, транспортування й зберігання з одночасним обмеженням відхилень від цільових показників якості та обсягу. Система обмежень поєднує баланси маси й умісту, продуктивність кар'єрів і фабрики, послідовність відпрацювання, місткість та режими техногенних родовищ, а також умови формування шихти з потоків різних кар'єрів. Методологічно використано аналіз і синтез наукових джерел літератури та побудову багатоперіодної моделі з подальшим обґрунтуванням еволюційної процедури пошуку рішень, а саме генетичний алгоритм, як придатної до дискретної, жорстко обмеженої та багатокритеріальної постановки. У статті наведено постановку, структуру змінних, цільову функцію та обмеження. Практичний ефект полягає в підвищенні керованості якістю рудопотоку й зниженні витрат завдяки узгодженому балансуванню видобутку, складуванню та відбору з техногенних об'єктів, що створює основу для адаптивного проектування режиму в умовах динамічного середовища.

Ключові слова: гірничодобувний кластер, режим гірничих робіт, динамічний бортовий вміст, техногенне родовище, шихта, адаптивна оптимізація, генетичний алгоритм.

Hryhoriev Yulian, Lutsenko Serhii, Hryhoriev Ihor, Pylypchuk Davyd, Lebedenko Volodymyr.
Adaptive optimization of the mining schedule of the mining cluster using a heuristic multi-criterion algorithm

The study provides the scientific substantiation and formalization of an approach to determining the mining schedule at the scale of a mining cluster that integrates several open pits and technogenic deposits. The starting premise is the need to stabilize mill feed – both tonnage and head grade – under spatial grade variability, a dynamic cut-off grade, and changing external drivers. The literature analysis confirms an evolution from deterministic pit-limit and calendar scheduling approaches to formulations that account for geological uncertainty and the requirements of blend stabilization. These findings motivate the choice of evolutionary methods as the basic computational paradigm for obtaining robust solutions in a discrete, multi-objective, and tightly constrained search space.

A mathematical formulation is proposed in which the objective function minimizes total mining, haulage, and stockpiling costs while simultaneously bounding deviations from target tonnage and head grade. The constraint set enforces tonnage- and grade-balance, mine and plant throughput, mining sequence, capacities and operating modes of technogenic deposits/stockpiles, as well as blending conditions across streams from different pits. Methodologically, the work employs analysis and synthesis of the technical literature and the construction of a multi-period model, followed by the justification of an evolutionary search procedure – specifically, a genetic algorithm – as suitable for a discrete, tightly constrained, and multi-criteria mine-scheduling setting. The article presents the problem statement, variable structure, objective function, and constraints. The practical effect lies in improving control of ore-stream quality and reducing costs through coordinated balancing of extraction, stockpiling, and reclaim from technogenic deposits, providing a basis for adaptive mine scheduling under dynamic conditions.

Key words: mining cluster, mining schedule, dynamic cut-off grade, man-made deposit, mill feed, adaptive optimization, genetic algorithm.

Вступ. Вибір та обґрунтування режиму гірничих робіт глибоких залізородних кар'єрів у сучасних умовах дедалі частіше виходять за межі детермінованих локальних постановок і трансформуються в завдання керування кластером кар'єрів, пов'язаних спільними рудопотоками, інфраструктурою та обмеженнями переробки. Для таких систем характерні значущі джерела невизначеності: варіабельність вмісту корисного компонента в масиві, зміни фізико-механічних властивостей гірничої маси, нерівномірність фронтів робіт, коливання попиту та цінові флуктуації, що безпосередньо впливають на бортовий уміст і баланс між обсягами видобутку, складування та відпрацювання техногенних родовищ. Накопичений масив досліджень із календарного планування, методів лінійного та стохастичного програмування, імітаційного моделювання та еволюційних підходів засвідчує їх ефективність у специфічних підкласах завдань. Водночас проблематика інтегрованого, адаптивного керування режимом у масштабі кластера, коли необхідно одночасно стабілізувати якість й обсяг вантажопотоку руди на збагачення та мінімізувати сумарні витрати на виймання та зберігання, залишається відкритою.

Метою роботи є наукове обґрунтування методичного підходу до адаптивної оптимізації режиму гірничих робіт на рівні гірничодобувного кластера за умов динамічного середовища. Запропонована постановка спирається на формалізацію взаємодії кар'єрів і техногенних родовищ у єдиній моделі потоків, урахування динамічних обмежень технології та

вимог до стабільності рудопотоку, а також на застосування обчислювальних процедур, здатних ефективно працювати з багатофакторною невизначеністю та нелінійностями.

Аналіз досліджень та публікацій. Сучасне проектування режиму відкритих гірничих робіт дедалі частіше виходить за межі окремого кар'єра й переходить до керування об'єднаними системами видобутку та переробки. Для умов Кривбасу таке бачення вже було концептуально обґрунтовано через створення гірничодобувного кластера [1], що створює можливості для узгодженого керування рудопотоками, складуванням і відпрацюванням техногенних родовищ у спільній інфраструктурі. На цьому фоні еволюція наукових підходів до визначення режиму гірничих робіт має вигляд поступового переходу від жорстких детермінованих схем до постановок, що враховують невизначеність і багатокритерійність.

Класичний етап сформувався навколо алгоритмічного вибору кінцевого контуру кар'єра та опосередковано – календарного порядку відпрацювання блоків. Визначальним тут став метод Лерча-Гроссмана, який задав подальшу структуру гірничо-геометричного обґрунтування й на десятиліття став промисловим стандартом для контурного проектування [2]. Подальший розвиток зосередився на погодженні режиму робіт з економічними вимогами переробки через часове керування бортовим умістом. Методологія динамічного бортового вмісту [3] забезпечила ув'язку видобутку, внутрішніх черг відпрацювання уступів і стабілізації якості рудної шихти, що було інтегровано в календарні

моделі й програмні комплекси планування відкритих гірничих робіт [4].

Водночас подальшу практика проектування засвідчила обмеженість детермінованих рішень у реальних умовах просторової мінливості вмістів, похибок геолого-розвідувальних даних і ринкових коливань. Переконливо показано, що помилки на стадії оцінки ресурсів і запасів безпосередньо призводять до відхилень фактичних показників від планових і до втрат, якщо ці невизначеності не враховують на етапі моделювання [5]. Відповіддю стала стохастична школа стратегічного планування, яка системно вводить невизначеність до постановки завдання: непоодинокі узагальнені сценарії, а сімейства геостатистично узгоджених варіантів проєктів розробки родовища, за якими оцінюють імовірність досягнення цілей за обсягом і якістю подання на переробку [6]. Узагальнення десятирічного розвитку цього напрямку показало, що стохастичні моделі підвищують надійність довгострокових планів і дають змогу керувати ризиком невиконання обмежень за якістю та продуктивністю [7]; доповнено це підходами до розкладання видобутку за умов невизначеності постачання, де план зберігає стійкість до змін вмістів і параметрів відкритої розробки [8].

Окремі публікації спрямовані на зв'язок режимних рішень із просторовою моделлю розробки та інфраструктурою підприємства. Досліджуються конфігурації внутрішніх контурів, послідовність відпрацювання уступів, маршрутизація розкривних порід та формування відвалів у логіці єдиного виробничого циклу. Зазначається, що таке ув'язування підвищує керованість календарними планами та дає змогу своєчасно враховувати слабкі місця технологічної частини проєкту [9]. Огляди останніх років фіксують зрілість інструментарію – від загальних обчислень до календарних моделей зі штрафами за відхилення якості та обсягу, і водночас указують на дефіцит робіт, які б повноцінно інтегрували стохастичність геологічних даних із реальними обмеженнями змішування й пропускних здатностей [10; 11].

Аналіз дав змогу виявити на рівні кластера відсутність усталених моделей оптимізації режиму, де одночасно враховано:

- 1) узгоджене виймання в кількох кар'єрах із просторово-часовою дискретністю;
- 2) взаємодію з усереднювальними складами та техногенними родовищами;
- 3) стабілізацію якісних параметрів під динамічний бортовий вміст;
- 4) мінімізацію сумарних витрат на виймання, транспортування й зберігання.

З огляду на комбінаційну природу рішень, багатокритеріальні цілі та потребу в адаптивності під впливом зовнішніх тригерів (ціна, попит, обмеження переробки), природним інструментом пошуку квазіоптимальних планів є еволюційні методи, насамперед генетичні алгоритми. Вони допомагають кодувати технологічні обмеження у вигляді конкретних умов, працюють із дискретними рішеннями та легко узгоджуються з багатосценарними оцінками якості й обсягу.

Методи та методики дослідження. Методологія дослідження поєднує аналіз і синтез сучасної науково-технічної літератури з формалізацією багатоперіодної моделі режиму гірничих робіт для сукупності кар'єрів і техногенних родовищ. Модель побудовано як завдання мінімізації сукупних витрат за умови стабілізації якості та обсягу подання на збагачення; систему обмежень утворюють баланси маси й вмісту, продуктивність кар'єрів і фабрики, послідовність відпрацювання родовища, місткість та режим функціонування техногенного родовища, а також умови дотримання геометричних меж розробки. Для вибору раціональної обчислювальної схеми виконано порівняльний огляд ідей імітаційного моделювання та цілочисельного лінійного програмування з оцінкою їх придатності до кластерної постановки. На основі цього обґрунтовано концепцію еволюційної процедури, зокрема генетичного алгоритму, як інструмента подальшої оптимізації з кодуванням технологічних обмежень у структурі рішення. Первинну верифікацію виконано шляхом логічного контролю досяжності вимог за якістю й обсягом у кожному періоді та перевірки узгодженості балансових співвідношень.

Результати. Сформулюємо та опишемо математичну постановку задачі визначення режиму гірничих робіт для гірничодобувного кластера, який налічує кілька кар'єрів і техногенних родовищ. Спираємось на те, що кар'єри відпрацьовують крутоспадні поклади руд зі змінним вмістом; частина бідної руди, тимчасово недоцільної до переробки, акумулюється в техногенному родовищі з подальшим відбором, тобто техногенні об'єкти функціонують у режимах і накопичення, і відпрацювання. Для забезпечення безперебійної роботи збагачувальної фабрики передбачається стабілізоване подання рудної шихти фіксованого обсягу та цільового вмісту, сформованої з потоків різних кар'єрів; при цьому продуктивність кожного кар'єра за рудою може змінюватися в часі, тоді як продуктивність за гірничою масою підтримується сталою. Постановка містить змінні обсяги виймання по кар'єрах і періодах, показники

якості шихти, а також потоки з техногенних родовищ. Систему обмежень при цьому утворюють баланси маси та вмісту, продуктивність кар'єрів і фабрики, послідовність відпрацювання, а також режимні умови функціонування техногенних об'єктів.

Критерій оптимальності визначаємо як мінімізацію сукупних витрат на виймання, транспортування та зберігання з додатковою вимогою мінімізувати відхилення від цільових показників щодо обсягу та якості рудної маси, що подається на збагачення. Така постановка забезпечує узгодженість виробничих рішень на рівні кластера за наявності різноякісних рудопотоків і дає змогу формалізовано керувати балансом між видобутком, складуванням та переробкою.

$$\min \left(\alpha \sum_{x,y,z,t} (e^t_{xyz} + s^t_{xyz}) C^t_{xyz} + \beta \left| \sum_{x,y,z,t} e^t_{xyz} V - V^t_{\text{target}} \right| + \gamma \left| \frac{\sum_{x,y,z,t} e^t_{xyz} Q_{xyz} V}{\sum_{x,y,z,t} e^t_{xyz} V} - Q^t_{\text{target}} \right| \right) \quad (1)$$

де x, y, z – координати блоку в тривимірному просторі;

Q_{xyz} – вміст корисного компонента в блоці за координатами x, y, z ;

C^t_{xyz} – вартість виймання блоку за координатами x, y, z у році t , г. о.;

V – постійний об'єм кожного блоку, м³;

Q^t_{target} – цільовий уміст корисного компонента, який потрібен для збагачувальної фабрики у році t , %;

V^t_{target} – цільовий об'єм руди, який потрібно подати на фабрику за певний період у році t , м³;

α, β, γ – вагові коефіцієнти для балансування між витратами і якісними показниками розробки;

Змінними параметрами будуть:
 e^t_{xyz} – бінарна змінна, яка вказує, чи видаляється блок за координатами x, y, z у році t ;
 s^t_{xyz} – бінарна змінна, яка вказує, чи зберігається блок за координатами x, y, z техногенному родовищі в році t .

При пошуку оптимуму мають бути враховані деякі обмеження. По-перше, блок може бути вилучений, якщо безпосередньо над ним немає іншого блоку:

$$e^t_{xyz} \leq 1 - e_{x,y,z,t+1} \quad (2)$$

Також варто враховувати, що об'єм вилученої з техногенного родовища сировини не може перевищувати об'єму заскладованої:

$$\sum_{x,y,z,t} s^t_{xyz} V \leq \sum_{x,y,z,t} (1 - e^t_{xyz}) V \quad (3)$$

Рудна маса, що подається на збагачувальну фабрику, повинна мати постійну якість і кількість, враховуючи вибір з кар'єрів і техногенних родовищ:

$$\left| \sum_{x,y,z,t} e^t_{xyz} V - V^t_{\text{target}} \right| \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\left| \frac{\sum_{x,y,z,t} e^t_{xyz} Q_{xyz} V}{\sum_{x,y,z,t} e^t_{xyz} V} - Q^t_{\text{target}} \right| \rightarrow \min \quad (5)$$

Ця постановка задачі дає змогу комплексно підійти до планування гірничих робіт, враховуючи не тільки економічні, а й технологічні аспекти виймання та переробки руди.

Пропонована модель задає багатоперіодну, жорстко обмежену та дискретну постановку на рівні кластера. Просторово-часові пріоритети, баланси маси та вмісту, місткість складів і вимога близької до сталого подання на збагачення породжують комбінаційну вибуховість варіантів і виражені нелінійності цільової функції та обмежень. За таких умов точні методи з повним перебором або великі змішані цілочислові схеми швидко втрачають обчислювальну придатність (релаксаційні розриви, нестійкість), а локальні евристики мають схильність скочуватися на часткових рішеннях без гарантій глобального поліпшення.

Еволюційний підхід, зокрема генетичний алгоритм, безпосередньо відповідає природі задачі: природне кодування дискретних рішень через бінарні змінні, що відбивають статус блоку; єдина оцінювальна функція, яка суміщає витрати на виймання, транспортування, зберігання з штрафами за відхилення від цільових показників за обсягом і якістю; механізми відбору, схрещування й мутації, що дають змогу досліджувати простір рішень, зберігаючи технологічні стримувальні умови через убудовані перевірки. У термінах цієї статті кожен індивід інтерпретується як варіант календарного плану відпрацювання родовища. Оцінювання здійснюється за функцією пристосованості, яка враховує подання на фабрику (за кількістю і якістю) та витратні складники згідно із цільовою функцією моделі, тоді як відбір, схрещування (одноточкове, двоточкове, рівномірне) і мутація реалізують кероване різноманіття та відсікання слабких рішень.

Висновки. Так, у роботі запропоновано математичну інтерпретацію задачі визначення режиму гірничих робіт у системі гірничодобувного кластера, вирішення якої пропонується з використанням генетичного алгоритму як інструмента розв'язання складної багатокритеріальної оптимізаційної задачі.

Підхід забезпечує одночасне узгодження витратного складника гірничих робіт із вимогами до обсягу та якості рудної маси, що подається на збагачення. Цільова функція сформована

так, щоб передбачити річний перегляд бортового вмісту корисного компонента відповідно до змін зовнішніх умов, забезпечуючи адаптивне коригування режиму відпрацювання без порушення технологічних обмежень.

У підсумку розроблений підхід поглиблює засади динамічного проектування режиму гірничих робіт і підвищує здатність

гірничо-видобувного кластера оперативно реагувати на варіації середовища, зберігаючи керуваність якісними показниками рудопотоку та мінімізуючи сукупні витрати на виймання й зберігання. У подальших дослідженнях планується уточнення параметрів генетичного алгоритму, зокрема розміру вибірки варіантів, імовірності мутації та кросовера.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Hryhoriev Y., Lutsenko S., Systierov O., Kuttybayev A., Kuttybayeva A. Implementation of sustainable development approaches by creating the mining cluster: the case of MPP "Inguletskiy". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. 1254(1). 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012055>.
2. Lerchs H., Grossmann I. F. Optimum Design of Open Pit Mines. *Canadian Institute of Mining Bulletin*. 1965. № 58. P. 47–54.
3. Григор'єв Ю. І. Обґрунтування методики адаптивного формування календарного плану гірничих робіт з урахуванням змінної якості рудної сировини та динаміки ринкової кон'юнктури. *Технічна інженерія*. 2025. № 1(95). С. 124–130. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-124-130](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-124-130).
4. Whittle J., Wharton C. Optimizing cut-offs over time. *Proceedings of the 25th International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries*. 1995. P. 261–265.
5. Dominy S., Noppé M., Annels A. Errors and Uncertainty in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation: The Importance of Getting it Right. *Exploration and Mining Geology*. 2002. № 11(1–4). P. 77–98. <https://doi.org/10.2113/11.1-4.77>.
6. Dimitrakopoulos R. Strategic mine planning under uncertainty: Stochastic optimization for strategic mine planning: A decade of developments. *Journal of Mining Science*. 2011. № 47(2). P. 138–150.
7. Dimitrakopoulos R.; Farrelly C. T.; Godoy M. Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design. *Mining Technology*. 2002. № 111(1). P. 82–88. <https://doi.org/10.1179/mnt.2002.111.1.82>.
8. Ramazan S., Dimitrakopoulos R. Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem. *Optimization and Engineering*. 2012. № 14(2). P. 361–380. <https://doi.org/10.1007/s11081-012-9186-2>.
9. Groeneveld B., Topal E., Leenders B. Examining system configuration in an open pit mine design. *Resources Policy*. 2019. № 63. 101438. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101438>.
10. Buelga Díaz A., Diego Álvarez I., Castañón Fernández C., Krzemień A., Iglesias Rodríguez F. J. Calculating ultimate pit limits and determining pushbacks in open-pit mining projects. *Resources Policy*. 2021. № 72. 102058. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102058>.
11. Das R., Topal E., Mardaneh E. A review of open pit mine and waste dump schedule planning. *Resources Policy*. 2023. № 85. 104064. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104064>.

REFERENCES:

1. Hryhoriev, Y., Lutsenko, S., Systierov, O., Kuttybayev, A., & Kuttybayeva, A. (2023). Implementation of sustainable development approaches by creating the mining cluster: The case of MPP "Inguletskiy". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012055>
2. Lerchs, H., & Grossmann, I. F. (1965). Optimum design of open pit mines. *Canadian Institute of Mining Bulletin*, 58, 47–54.
3. Hryhoriev, Yu. I. (2025). Obgruntuvannia metodyky adaptivnoho formuvannia kalendarnoho planu hirnychkykh robіt z urakhuvanniam zminnoi yakosti rudnoi syrovyny ta dynamiky rynkovoї kon'iunkturny [Substantiation of a method for adaptive formation of a calendar plan of mining operations considering variable ore quality and market dynamics]. *Tekhnichna inzheneriia – Technical Engineering*, 1(95), 124–130. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-124-130](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-124-130) [in Ukrainian]
4. Whittle, J., & Wharton, C. (1995). Optimizing cut-offs over time. In *Proceedings of the 25th International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries* (pp. 261–265).
5. Dominy, S., Noppé, M., & Annels, A. (2002). Errors and uncertainty in mineral resource and ore reserve estimation: The importance of getting it right. *Exploration and Mining Geology*, 11(1–4), 77–98. <https://doi.org/10.2113/11.1-4.77>

6. Dimitrakopoulos, R. (2011). Strategic mine planning under uncertainty: Stochastic optimization for strategic mine planning: A decade of developments. *Journal of Mining Science*, 47(2), 138–150.
7. Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C. T., & Godoy, M. (2002). Moving forward from traditional optimization: Grade uncertainty and risk effects in open-pit design. *Mining Technology*, 111(1), 82–88. <https://doi.org/10.1179/mnt.2002.111.1.82>
8. Ramazan, S., & Dimitrakopoulos, R. (2012). Production scheduling with uncertain supply: A new solution to the open pit mining problem. *Optimization and Engineering*, 14(2), 361–380. <https://doi.org/10.1007/s11081-012-9186-2>
9. Groeneveld, B., Topal, E., & Leenders, B. (2019). Examining system configuration in an open pit mine design. *Resources Policy*, 63, 101438. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101438>
10. Buelga Díaz, A., Diego Álvarez, I., Castañón Fernández, C., Krzemień, A., & Iglesias Rodríguez, F. J. (2021). Calculating ultimate pit limits and determining pushbacks in open-pit mining projects. *Resources Policy*, 72, 102058. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102058>
11. Das, R., Topal, E., & Mardaneh, E. (2023). A review of open pit mine and waste dump schedule planning. *Resources Policy*, 85, 104064. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104064>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 662.662.641:902/904

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-21>

ТОРФ ЯК ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РЕСУРС: ТИПОЛОГІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Ішков Валерій Валерійович,

кандидат геолого-мінералогічних наук, доцент,
доцент кафедри геології та розвідки родовищ корисних копалин
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
старший науковий співробітник лабораторії досліджень
структурних змін гірських порід
Інституту геотехнічної механіки імені М. С. Полякова
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-3987-208X

Козій Євген Сергійович,

кандидат геологічних наук,
старший науковий співробітник лабораторії досліджень
структурних змін гірських порід
Інституту геотехнічної механіки імені М. С. Полякова
Національної академії наук України,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-2167-6224

Колчев Костянтин Михайлович,

аспірант
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-1345-8646

Сахно Світлана Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-3917-9143

Представлений комплексний аналіз сучасних підходів до енергетичного використання торфу з позицій технологічної трансформації ресурсу. На основі широкого огляду наукових публікацій, патентних рішень та технічних регламентів запропоновано класифікацію, структуровану за принципом поглиблення технологічної обробки торфу від його прямого використання до складних переробних процесів. У роботі виокремлено п'ять ключових напрямів: пряме спалювання, композитні види палива, термохімічна переробка, біотехнологічні методи та функціональне застосування торфу у вигляді спеціалізованих матеріалів.

Показано, що торф завдяки широкій варіативності фізико-хімічних властивостей може бути адаптований до різних енергетичних систем, виконуючи роль як кінцевого енергоносія, так і проміжної сировинної ланки для отримання твердих, рідких та газоподібних продуктів. Проаналізовано переваги та обмеження кожного напрямку, зокрема низьку енергоефективність прямого спалювання, потенціал підвищення калорійності композитних палив, широкі можливості термохімічних процесів для одержання синтез-газу та рідких палив, а також перспективність анаеробного зброджування та ферментаційних методів для виробництва біогазу.

Запропонована класифікація забезпечує логічну систематизацію сучасних технологій, є придатною для практичної інтеграції в енергетичні проєкти, стандартизацію паливних матеріалів і використання в освітніх та наукових цілях. Наукова новизна роботи полягає в переході від традиційних підходів до технологічно орієнтованої моделі аналізу енергетичного потенціалу торфу.

Ключові слова: торф, енергетичне використання, термохімічна переробка, композитне паливо, піроліз, газифікація, біогаз.

Ishkov Valerii, Kozii Yevhen, Kolchev Konstantin, Sakhno Svitlana. Peat as an energy resource: typology of technological use

The study presents a comprehensive analysis of modern approaches to the energy use of peat from the perspective of technological transformation of the resource. Based on an extensive review of scientific publications, patent solutions, and technical regulations, a classification is proposed that is structured according to the principle of increasing technological complexity from the direct use of peat to advanced processing methods. The paper identifies five key directions: direct combustion, composite fuels, thermochemical conversion, biotechnological methods, and the functional application of peat in the form of specialized materials.

It is demonstrated that peat, owing to its wide variability in physicochemical properties, can be adapted to different energy systems, acting both as a final energy carrier and as an intermediate feedstock for producing solid, liquid, and gaseous products. The advantages and limitations of each direction are analyzed, including the low energy efficiency of direct combustion, the potential for increasing the calorific value of composite fuels, the broad capabilities of thermochemical processes for obtaining synthesis gas and liquid fuels, as well as the prospects of anaerobic digestion and fermentation methods for biogas production.

The proposed classification ensures a coherent systematization of modern technologies and is suitable for practical integration into energy projects, standardization of fuel materials, and use in educational and scientific contexts. The scientific novelty of the work lies in shifting from traditional approaches to a technologically oriented model for analyzing the energy potential of peat.

Key words: peat, energy utilization, thermochemical conversion, composite fuel, pyrolysis, gasification, biogas.

Вступ. Торф є одним із найдавніших видів біогенних палив, які використовувала людина для опалення, енергетичних потреб і технічних застосувань [1]. У контексті глобального енергетичного переходу, що супроводжується пошуком сталих, екологічно безпечних та локалізованих джерел енергії, торф як органічне викопне паливо знову привертає увагу наукової спільноти та промислових фахівців [2; 3]. Його формування в умовах болотних екосистем забезпечує унікальні фізико-хімічні властивості, які дають змогу використовувати торф не лише як традиційне тверде паливо, а і як сировину для отримання рідких і газоподібних енергоносіїв, композитних матеріалів та біотехнологічних продуктів [4].

Історично використання торфу в енергетиці було зосереджене переважно на його прямому спалюванні у вигляді кускового або фрезерного палива. Проте сучасні технології дають змогу значно розширити спектр його застосування від пресованих і гранульованих форм для автоматичних котлів до складних процесів термохімічної конверсії, як-от піроліз, газифікація та гідрогенізація [5]. Крім того, біотехнологічні підходи, зокрема анаеробне зброджування, відкривають перспективи отримання біогазу та рідких біопалив з торфу, особливо з його низинних, обводнених різновидів. Окрему увагу заслуговує використання торфу як функціонального компонента у фазозмінних матеріалах (PCM) для теплоакумулювальних систем, а також як карбонізованої добавки в металургії та цементній промисловості [3].

Попри різноманіття форм і методів використання, у науковій літературі досі відсутня систематизована класифікація енергетичних застосувань торфу, яка б ураховувала не лише

фізичні характеристики, а й технологічні принципи його трансформації. Така класифікація необхідна для уніфікації термінології, порівняння ефективності різних підходів, оптимізації ресурсного потенціалу та формування науково обґрунтованих стратегій використання торфу в енергетичних цілях. Попри існування значного світового досвіду промислового використання торфу в енергетиці, в Україні його роль залишається недостатньо визначеною, що зумовлює актуальність дослідження [6]. У статті запропоновано класифікацію, що базується на технологічному принципі трансформації торфу як енергетичного ресурсу. Вона охоплює пряме використання, термохімічну та біотехнологічну переробку, а також застосування в складі композитних матеріалів. Такий підхід дає змогу не лише систематизувати наявні знання, а й окреслити перспективні напрями наукових і прикладних розробок у сфері енергетичного використання торфу.

Короткий огляд літератури. Енергетичне використання торфу охоплює як традиційні, так й інноваційні фізико-хімічні та біотехнологічні процеси. У класичних дослідженнях [1; 2] торф переважно розглядався як тверде паливо (фрезерний, кусковий) для локальних котелень і ТЕЦ, що цінувалося за низьку зольність, доступність та екологічну перевагу над вугіллям. Сучасні роботи [3; 4] акцентують на термохімічній конверсії (піроліз, газифікація, гідрогенізація) для отримання синтез-газів, рідких палив і торф'яного коксу. Ці інноваційні процеси підвищують енергетичну ефективність та забезпечують адаптацію торфу до вимог сучасної теплоенергетики.

Особлива увага приділяється біотехнологіям, включно з анаеробним зброджуванням

торфу для біогазу (часто зі змішаними відходами) [5; 6]. Верховий торф із високим вмістом целюлози є перспективним для виробництва біоетанолу та бутанолу. У матеріалознавстві [7; 8] торф досліджується як компонент фазозмінних матеріалів (PCM) для теплоаккумуляції та як карбонізована добавка в цементній і металургійній галузях. Світові агенції [8] наголошують, що технологічний потенціал торфу залежить від методу переробки, дегідратації та хімічної модифікації. Нормативні документи [9] визначають вимоги до вологості, складу та теплотворної здатності, забезпечуючи стандартизацію паливних технологій.

Сучасні дослідження зосереджені на термохімічній конверсії торфу (піроліз, газифікація, карбонізація), його застосуванні як компонента змішаних палив та сировини для біогазу [10–12]. Незважаючи на обсяг публікацій, відсутня уніфікована класифікація форм енергетичного використання торфу, що враховує технологічну логіку його трансформації. Ця прогалина ускладнює порівняльний аналіз ефективності та інтеграцію результатів. Отже, створення систематизованої класифікації енергетичного використання торфу є актуальним науковим завданням.

Мета роботи – розробити класифікацію енергетичного використання торфу на основі технологічного принципу.

Об'єкт дослідження: торф як органічне паливо.

Предмет дослідження: технологічні форми та методи енергетичного використання торфу.

Методологія дослідження. Методологія виконаного дослідження ґрунтується на принципах системного аналізу, класифікаційного моделювання та технологічної типологізації. Для забезпечення міждисциплінарної узгодженості застосовано інтегрований підхід, що поєднує контент-аналіз та глибинний аналіз літературних джерел.

На першому етапі контент-аналіз сформував кількісну картину розподілу технологій торфу. На основі репрезентативної вибірки джерел (монографії, статті, патенти, регламенти) визначено п'ять ключових категорій: пряме спалювання, композитні палива, термохімічна конверсія, біотехнологічна трансформація та функціональне застосування. Кількісний аналіз частоти згадувань виявив тенденції: зростання інтересу до біотехнологічних методів, стабільну увагу до термохімічних процесів (піроліз, газифікація) та скорочення частки досліджень прямого спалювання.

Наступний, глибинний, аналіз забезпечив якісне осмислення цих даних. Детальне

опрацювання наукових праць дало змогу провести порівняльну оцінку технологій за критеріями енергетичної ефективності, екологічності та реалізованості. Цей аналіз також виявив прогалини: недостатню систематизацію композитних палив та обмеженість досліджень торфу у сфері фазозмінних матеріалів (PCM-систем). На підставі цих прогалин сформульовано перспективні напрями, включно з інтеграцією торфу в циркулярну економіку та стандартизацію композитних палив.

Інтеграція кількісних і якісних результатів стала основою для розробки систематизованої класифікаційної схеми. Первинні дані групувалися за функціональними ознаками, зіставляючи параметри (теплота згоряння, вологість, зольність) та технологічні характеристики [13]. Критеріями поділу обрано форму кінцевого енергоносія, ступінь технологічної переробки та енергетичну ефективність. Класифікаційна модель верифікована порівняльним методом із залученням схем ЄС та Північної Америки [14]. Запропонована схема, що враховує ступінь переробки й агрегатний стан торфу, систематизує знання в п'ять категорій, забезпечуючи структурування наявних даних та окреслення перспектив у контексті ресурсної оптимізації.

Результати досліджень. У процесі дослідження здійснено комплексний аналіз сучасних форм енергетичного використання торфу, що охоплюють традиційні та інноваційні технології. Установлено, що завдяки варіативності фізико-хімічних властивостей, ступеня гуміфікації та морфології, торф може бути адаптований до широкого спектра енергетичних систем. Важливе те, що торф є не лише кінцевим енергопродуктом, а й проміжною ланкою для отримання вторинних енергоносіїв (твердих, рідких, газоподібних).

На основі контент-аналізу джерел виокремлено п'ять ключових напрямів використання торфу. Їх систематизація дала змогу побудувати структуровану логіку перетворення – від мінімальної до складної переробки з формуванням хімічно модифікованих енергоносіїв.

Перший напрям – пряме спалювання (кусковий, фрезерний, гранульований торф). Незважаючи на доступність і можливість інтеграції в локальні теплові системи, цей метод демонструє обмежену енергоефективність через високу вологість торфу. Проте розвиток автоматичних котлів та використання пресованих форм підвищує стабільність та енергетичну рівномірність спалювання [14].

Другий напрям – композитні види палива, де торф може виступати як матриця, сполучний

компонент або модифікатор реології (наприклад, у водо-вуглецевих паливних суспензіях). Аналіз показав, що торф у поєднанні з деревинною сировиною, вугіллям, аграрними відходами або техногенними відходами (зокрема мулом очищення стічних вод) здатний продемонструвати підвищену калорійність, знижену токсичність викидів та покращені показники механічної стабільності під час транспортування [15].

Третій напрям – термохімічна переробка, яка містить піроліз, газифікацію та гідрогенізацію. Установлено, що саме цей напрям забезпечує найширший спектр енергетичних продуктів: від твердого торф'яного коксу з високим вмістом фіксованого вуглецю до синтез-газу, рідких палив і піролізної біоолії. Між порівняними сценаріями газифікація демонструє найбільший потенціал інтеграції в системи з виробництвом водню та синтетичних палив, тоді як піроліз залишається найефективнішим варіантом отримання вуглецевих сорбентів та матеріалів для акумулювання тепла.

Четвертий напрям – біотехнологічна трансформація, зокрема анаеробне зброджування торфу із чистими субстратами або в складі змішаних органічних систем. Аналіз показав, що цей підхід дає змогу компенсувати низьку біодоступність структурованої торф'яної органіки завдяки коферментації, що забезпечує отримання біогазу з досить стабільним виходом метану. Деякі типи торфів (особливо целюлозно-лігнінові верхові різновиди) можуть слугувати також базою для ферментаційного виробництва біоетанолу чи бутанолу.

П'ятий напрям – функціональне використання торфу, яке охоплює створення фазозмінних РСМ-композитів для акумулювання тепла, а також використання карбонізованого

торфу як технічної добавки в цементній, металургійній та суміжних промисловостях. Таке застосування демонструє потенціал торфу не лише як джерела енергії, а і як матеріального елемента енергетичної інфраструктури, що розширює його роль за межі класичної парадигми «паливо – продукт згоряння».

Для забезпечення структурної узгодженості дослідження всі зазначені напрями узагальнено у вигляді технологічної класифікації, що представлена в Таблиці 1. Вона охоплює типи палива, технологічні процеси, форми агрегування та приклади застосування.

Висновки

1. Запропонована класифікація дає змогу систематизувати різноманітні форми енергетичного використання торфу на основі технологічного принципу трансформації, що забезпечує логічну повноту та структурну чіткість.

2. Урахування агрегатного стану, ступеня переробки та способу інтеграції в енергетичні системи дає змогу порівнювати ефективність різних підходів, оцінювати їх екологічну та економічну доцільність.

3. Таблична форма класифікації сприяє її практичному застосуванню в наукових дослідженнях, техніко-економічному моделюванні, освітніх програмах та проєктуванні енергетичних систем з використанням торфу.

Наукова новизна роботи полягає в розробці класифікації енергетичного використання торфу, що базується не на традиційних фізико-хімічних ознаках, а на технологічному принципі трансформації, що охоплює весь спектр сучасних методів переробки. Такий підхід дає змогу інтегрувати класифікацію в міждисциплінарний контекст – від енергетики до матеріалознавства та біотехнологій.

Таблиця 1

Технологічна класифікація енергетичного використання торфу

Напрями застосування	Продуктова форма	Технологічний процес	Агрегатний стан	Сфери застосування
Пряме спалювання	Кусковий, фрезерний, пресований, гранульований торф	Сушіння, спалювання	Тверде	ТЕЦ, котельні, побутове опалення
Композитні види палива	Торфовугілля, торфосолома, торфовідходні брикети, водоторфовугільні суспензії	Змішування, пресування	Тверде / рідке	Альтернативне паливо для котлів
Термохімічна переробка	Торф'яний кокс, піролізна рідина, синтез-газ	Піроліз, газифікація, гідрогенізація	Тверде / рідке / газоподібне	Хімічна промисловість, енергетика
Біотехнологічна переробка	Біогаз, біоетанол, бутанол	Анаеробне зброджування, ферментація	Газ / рідина	Біоенергетика, аграрні комплекси
Функціональне використання	РСМ-композити, карбонізовані добавки	Карбонізація, імпрегнація	Тверде	Теплоакумуляція, цемент, металургія

Практична цінність результатів дослідження полягає в тому, що запропонована класифікація може бути використана: 1) для оптимізації енергетичних проєктів з використанням торфу;

2) у нормативно-технічній документації як основа для стандартизації видів торф'яного палива; 3) як інструмент для порівняльного аналізу технологій у наукових дослідженнях та інноваційних розробках.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Joosten H., Clarke D. Peatlands and Climate. *Brussels: EU Publishing*, 2020. 215 p.
2. Tanneberger F., Wichtmann W., Schröder J. Peat for renewable energy. *Energy Policy*. 2022. Vol. 158. P. 112–128.
3. ASTM International. Standard Specification for Peat Fuel. *ASTM Standard D4404-21*. West Conshohocken, 2021. 37 p.
4. IEA Bioenergy. Peat-based transition fuels report. Paris: International Energy Agency, 2024. 56 p.
5. European Peat Society. *Peat sector analytical review*. Helsinki, 2024. 48 p.
6. Nilsson M. Combustion behaviour of peat fuel. *Fuel*. 2023. Vol. 336. Art. 127189.
7. Hansen J., Larsen P. Moisture–energy correlation in peat. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 152. P. 455–462.
8. IPCC. Degraded peatlands and emissions. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Geneva: IPCC Secretariat, 2022. P. 411–423.
9. Bentsen N. S., Holm-Nielsen J. B. Peat-biomass fuel systems. *Biomass & Bioenergy*. 2021. Vol. 150. Art. 106108.
10. Klimavičius A., Žapkus L., Petrauskas R. Fuel pellets based on peat blends. *Energy Technology*. 2024. Vol. 12. No. 4. Art. 228031.
11. Kumar S., Ahmed H. Pyrolysis of peat biomass as renewable feedstock. *Journal of Thermal Science and Energy Systems*. 2022. Vol. 44. P. 302–315.
12. Liang R. Syngas production from peat feedstocks. *Energy Conversion Science*. 2025. Vol. 19. No. 2. P. 88–105.
13. Rajamanickam R., Shankar V. Gasification pathways for peat: technological review. *International Journal of Clean Energy*. 2023. Vol. 11. No. 3. P. 145–162.
14. Rintala J., Mäkelä M. Anaerobic digestion of peat-based substrates. *Bioprocess Engineering*. 2021. Vol. 64. P. 251–263.
15. Шубаріна О. Енергетичний потенціал торфових ресурсів України. Київ : НТУУ «КПІ», 2022. 142 с.

REFERENCES:

1. Joosten, H., & Clarke, D. (2020). Peatlands and Climate. *Brussels: EU Publishing*, 215 p.
2. Tanneberger, F., Wichtmann, W., & Schröder, J. (2022). Peat for renewable energy. *Energy Policy*, 158, 112–128.
3. ASTM International. Standard Specification for Peat Fuel (2021). *ASTM Standard D4404-21*. West Conshohocken, 37 p.
4. IEA Bioenergy (2024). Peat-based transition fuels report. Paris: International Energy Agency, 56 p.
5. European Peat Society (2024). *Peat sector analytical review*. Helsinki, 48 p.
6. Nilsson, M. (2023). Combustion behaviour of peat fuel. *Fuel*, 336, 127189.
7. Hansen, J., & Larsen, P. (2020). Moisture–energy correlation in peat. *Renewable Energy*, 152, 455–462.
8. IPCC (2022). Degraded peatlands and emissions. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Geneva: IPCC Secretariat, 411–423.
9. Bentsen, N. S., & Holm-Nielsen, J. B. (2021). Peat-biomass fuel systems. *Biomass & Bioenergy*, 150, 106108.
10. Klimavičius, A., Žapkus, L., & Petrauskas, R. (2024). Fuel pellets based on peat blends. *Energy Technology*, 12, 4, 228031.
11. Kumar, S., & Ahmed, H. (2022). Pyrolysis of peat biomass as renewable feedstock. *Journal of Thermal Science and Energy Systems*, 44, 302–315.
12. Liang, R. (2025). Syngas production from peat feedstocks. *Energy Conversion Science*, 19(2), 88–105.
13. Rajamanickam, R., & Shankar, V. (2023). Gasification pathways for peat: technological review. *International Journal of Clean Energy*, 11(3), 145–162.
14. Rintala, J., & Mäkelä, M. (2021). Anaerobic digestion of peat-based substrates. *Bioprocess Engineering*, 64, 251–263.
15. Shubarina, O. (2022). Energy Potential of Ukraine's Peat Resources. Kyiv : NTUU “KPI”, 142 p.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 622.876

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-22>

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОВІТРЮВАННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ У ВИБОЯХ ГЛИБОКИХ ШАХТ

Костенко Віктор Климентович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри природоохоронної діяльності
Державного вищого навчального закладу
«Донецький національний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0001-8439-6564

Богомаз Ольга Петрівна,

PhD, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-8521-0394

Каменець В'ячеслав Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0001-8169-2544

Акулич Андрій Миколайович,

директор департаменту з ремонтів Операційної дирекції
ТОВ "МЕТІНВЕСТ ХОЛДИНГ"
ORCID ID: 0009-0006-7222-3432

У статті розглянуто способи забезпечення комфортних і безпечних умов праці шахтарів у глибоких вибоях вугільних підприємств, де ця проблема набуває дедалі більшої актуальності. Наявні, ґрунтовані на температурних показниках, нормативи мікроклімату для підземних робочих місць унаслідок технічних та економічних причин відрізняються в негативну сторону від прийнятих для поверхні.

Покращувати мікрокліматичні умови на підземних робочих місцях можна шляхом охолодження шахтного повітря з одночасним частковим вилученням вологи. Розрахунки показали, що з осушенням та охолодженням повітря температурою 24 °С нижче точки роси мікрокліматичний показник Humidex зменшується з небезпечного рівня 37,7 до комфортного – 12,5. Сенс удосконалення полягає в доповненні установки місцевого провітрювання теплообмінником відкритого типу, який використовує скраплений азот, – відхід від підготовки металургійного кисневого дуття. Вилучення вологи із шахтного повітря зменшує його густину і, відповідно, витрати на провітрювання мережі гірничих виробок вентиляторами головного провітрювання.

Додатковою перевагою способу покращення стану на робочих місцях є отримання із шахти водного ресурсу доволі високої якості. Вилучення частини такого ресурсу дасть змогу зменшити витрати на придбання води для технологічних потреб та на пожежогасіння.

Узагальнення отриманих результатів дослідження дало змогу оцінити запропонований спосіб нормалізації умов праці гірників у глибоких шахтах, при комплексному підході, який передбачає кондиціювання повітря з одночасним вилученням води, а також полегшення режиму вентиляції гірничих виробок, забезпечує значні переваги з боку екології, промислової санітарії, технології та економіки. Для попереднього розрахунку параметрів та оцінки розробки використані фактичні дані по ПРАТ «Шахтоуправління "Покровське"».

Ключові слова: рудникова атмосфера, мікрокліматичні умови, мікрокліматичний показник осушення повітря, кондиціювання, теплообмінник, водний ресурс

Kostenko Viktor, Bohomaz Olha, Kamenets Viacheslav, Akulych Andrii. Improving ventilation and microclimatic conditions in deep mine walls

The article discusses ways to ensure comfortable and safe working conditions for miners in deep coal mines, where this problem is becoming increasingly relevant. Existing microclimate standards for underground workplaces, based on temperature indicators, differ negatively from those adopted for surface workplaces due to technical and economic reasons.

It is possible to improve microclimate conditions in underground workplaces by cooling the mine air while simultaneously removing some of the moisture. Calculations have shown that with dehumidification and cooling of the air to a temperature 24°C below the dew point, the Humidex microclimate index decreases from a dangerous level of 37.7 to a comfortable level of 12.5. The improvement consists in supplementing the local ventilation system with an open-type heat exchanger that uses liquefied nitrogen, a waste product from the preparation of metallurgical oxygen blast. Removing moisture from the mine air reduces its density and, accordingly, the cost of ventilating the network of mine workings with main ventilation fans.

An additional advantage of this method of improving working conditions is the extraction of fairly high-quality water resources from the mine. The extraction of part of these resources will reduce the cost of purchasing water for technological needs and firefighting.

A summary of the research results made it possible to evaluate the proposed method of normalizing the working conditions of miners in deep mines, using a comprehensive approach that includes air conditioning with simultaneous water extraction, as well as facilitating the ventilation of mine workings, provides significant advantages in terms of ecology, industrial sanitation, technology, and economics. Actual data from PJSC "Pokrovske Colliery Administration" was used for preliminary calculation of parameters and evaluation of the development.

Key words: mine atmosphere, microclimatic conditions, microclimatic indicator of air dehumidification, air conditioning, heat exchanger, water resources.

Вступ. В умовах швидкого розвитку суспільства, інтенсивної індустріалізації попит на енергетичну сировину у світі щороку зростає [1]. Водночас збільшення видобутку вугілля призвело до появи різного роду проблем з погляду на навколишнє середовище та безпеку [2]. До таких проблем належать ендегенні пожежі [3; 4], викиди метану, забруднення водних ресурсів стічними шахтними водами, просідання поверхні, знищення біологічної різноманітності [5] та деградація ґрунтів.

Поступове виснаження неглибоких мінеральних ресурсів вимагає збільшення глибини гірничих робіт, що, своєю чергою, призводить до погіршення мікрокліматичних умов гірничодобувного середовища [6–8] та інтенсивного забруднення, пов'язаного з накопиченням великої кількості гірничодобувних відходів на поверхні [9].

На сьогоднішній день виїмка вугілля на шахтах українського Донбасу відбувається на доволі глибоких горизонтах, що перевищують відмітки 600...800 м, а на деяких шахтах сягають 1200...1500 м. На таких глибинах температура породного масиву становить 25...40 °C і більше, а відносна вологість повітря дорівнює 70...100 %.

Сучасні українські норми мікроклімату на робочих місцях [10] передбачають підтримання, при виконанні важких робіт та робіт середньої важкості, температури не вище 28...29 °C, відносної вологості повітря не більш ніж 70...75 % (за температури 24...25 °C) та швидкості його руху 0,2...0,6 м/с. Перевищення вищевказаних меж температури повітря та відносної вологості призводить до скорочення виносу тепла з поверхні шкіри та загрози нагріву тіла вище критичного рівня, який має назву «кліматична катастрофа» [11].

Для підземних гірничих виробок за українськими нормативними документами

встановлено такі обмеження: максимально допустима температура +26 °C; швидкість руху повітря 0,25–0,6 м/с [12]. Відсутність обмежень щодо вологості повітря в гірничих виробках суперечить загальнодержавному підходу. Високі температури повітря в шахтних виробках у поєднанні з настільки ж високим рівнем вологості викликають серйозне погіршення мікрокліматичних умов, що призводить до ускладнення умов роботи гірників [13]. Проведені дослідження свідчать, що за вологості шахтного повітря 80 % та температури +35 °C бажано зупиняти всі важкі роботи [14], через зниження комфорту шахтарів, критичною за такої вологості є температура +37 °C [15].

Відомо, що у відносно «сухих» вибоях показники гомеостазу значно кращі порівняно з «вологими» за рівних температур. Продуктивність та безпека праці прохідників і робітників очисних вибоїв в умовах нагрівального мікроклімату різко зменшується. Збільшення швидкості теплового вологого повітря, що омине організм, пришвидшує накопичення тепла в тілі. Це, наприклад, чітко відчувають машиністи електровозів, що працюють на струмені повітря, що виходить із забоїв. З огляду на реальні теплові й вологі показники, у вибоях можна стверджувати, що проблема забезпечення комфортних і безпечних умов праці шахтарів зі збільшенням глибини розробки родовищ стає більш актуальною.

Зважаючи на вказане авторами, визначено **мету роботи:** обґрунтувати можливі способи покращення мікрокліматичних умов на робочих місцях у глибоких вугільних шахтах завдяки управлінню вологовмістом повітря.

Методи та методики дослідження. У роботі використано комплекс теоретично-розрахункових, що базуються на фундаментальних положеннях термодинаміки газів, та інженерно-геологічних і виробничих методів, спрямованих на

забезпечення комфортних та безпечних умов праці шахтарів у глибоких вибоях вугледобувних підприємств.

Результати. Проведено експерименти з охолодження повітря в підземних виробках шляхом розбризкування охолодженої води за допомогою форсунок або ежекторів [16], які дали змогу знизити температуру повітря в камері охолодження від 26...32 °С до 17...24 °С (ефективність охолодження становить 21...34 %), однак вологість при цьому збільшилася з 55...78 % до 75...80 %. Збільшення вмісту вологи в повітрі могло призвести до погіршення мікрокліматичних умов після підігріву повітря на шляху до робочих місць або перемішування з потоками теплого повітря.

Відомі оцінки умов стану людей на основі врахування сукупності факторів, як-от температура і вологість повітря, наприклад, Humidex – безрозмірна величина, у якій враховано точку роси [17]. Значення цього критерію розраховують за такою формулою:

$$\text{Humidex} = T + 0,5555 \cdot \left(6,11 \cdot e^{\frac{5417,7530}{273,15} \left(\frac{1}{273,15} - \frac{1}{T_d} \right)} - 10 \right) \quad (1)$$

де T – температура повітря, °С;

T_d – точка роси, К.

Установлено, що значення Humidex вище 30 заподіюють деякий дискомфорт, вище 40 – великий дискомфорт, а значення вище 45 є небезпечним, якщо Humidex сягає 54 – тепловий удар неминучий.

З результатів розрахункових значень Humidex видно, що вологість повітря суттєво впливає на розмір безпечного індексу (Humidex ≤ 30), за температури повітря 20 °С він досяжний за будь-якої вологості, а за 25 °С він можливий лише за вологості не більш як 50 % (табл. 1, рис. 2).

Фактичні мікрокліматичні умови у вибоях Шахтоуправління «Покровське» станом на липень 2024 року наведено в Табл. 2.

Деякі показники вентиляційної системи шахти мають такі величини:

1. Загальний об'єм підземних гірничих виробок – 2 548 524 м³.

2. Об'ємна витрата повітря на провітрювання гірничих виробок – 61 290 м³/хв = 1 021,5 м³/с.

3. За густини вологого повітря $\rho = 1205 + 25 = 1\,230$ г/м³ (геостатичний складник не враховано), масова витрата становить 75 386,7 г/с.

4. Водимість – 75386,7 * 0,02 = 1507,734 г/с, або 90 464,04 г/хв., або 5 427 842,4 г/год, або 130,268 2176 т/добу.

Керівною компанією стосовно Метінвест Покровськвугілля 30.09.2024 на IV квартал 2024 року ухвалено такі рішення:

1. Затвердити рівень страхового запасу коксівного вугілля в обсязі 200 тис. тонн марки К + Ж. Термін постійно.

2. Метінвест Покровськвугілля розглянути можливість реалізації резерву приросту обсягу по 2-й північній лаві блоку 11 Шахтоуправління «Покровське» в обсязі 40 тис. тонн. Термін 07.10.2024 р. (рис. 1).

3. Рішення щодо поставок Шахтоуправління Покровське на далекі ринки ухвалити в момент початку відвантаження в канал постачання залежно від поточної ситуації.

Але наприкінці того кварталу видобуток вугілля на всіх блоках шахтоуправління припинено через наближення лінії фронту та посилення обстрілів.

Унаслідок цього результати досліджень та експериментів можуть бути насамперед упроваджені на інших вугледобувних підприємствах України.

У сучасних виробничих умовах, на робочих місцях у гірничих виробках, через технологічні вимоги або економічну недоцільність використання засобів обдування, здушування, водоповітряного охолодження неможливо, а отже, у більшості виробках неможливо забезпечити й регламентовані інтенсивності теплового опромінення робітників. Аналіз отриманих даних свідчать про наявність значного потенціалу управління станом мікрокліматичних умов на робочих місцях сумісною зміною температури і вмісту водяної пари в повітрі. Теоретично обґрунтовано можливість забезпечення відносної комфортності праці гірників (Humidex ≤ 30...40) за підвищення температури повітря паралельним зниженням його вологості.

Таблиця 1

Розрахункові значення Humidex у характерних для підземних умов діапазонах вологості (φ, %) і температури (T, °С)

φ, % \ T, °С	Humidex				
	20	25	30	35	40
40	20,84539063	28,12785	36,10571	44,9450789	54,87397
60	24,06852164	32,52041	42,03788	52,8827681	65,37673
80	27,32001846	36,96135	48,03878	60,9237806	76,04124
100	30,59288443	41,43909	54,09809	69,0384027	86,8251

Таблиця 2

Мікрокліматичні умови у вибоях Шахтоуправління «Покровське»

Виробка	Витрата повітря, м ³ хв ⁻¹	Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %	Точка роси Td, °С	Humidex
Очисні ділянки					
11 північна лава блоку 10	1640	32	90	30,15	56,36
1 південна лава блоку 9	1330	31	90	29,16	53,67
1 лава південної панелі блоку 10	1800	29	90	27,19	48,55
6 лава південної панелі блоку 10	1960	30	90	28,17	51,06
Підготовчі вибої					
Монтажний хідник 2 південної панелі блоку 9	323	29	90	27,19	48,55
3 південний конвеєрний штрек блоку 10	334	28	87	25,63	45,30
Конвеєрний штрек 3 лави південної панелі блоку 10	351	28	87	25,63	45,30
Конвеєрний хідник розвантажувальної лави центральної панелі блоку 11	337	28	90	26,20	46,30
Південний повітряподавальний штрек гор. 930 м.	349	28	95	27,12	47,44
Вентиляційний хідник розвантажувальної лави центральної панелі блоку 11	318	29	95	28,11	49,96
1 південний конвеєрний штрек блоку 9	284	30	90	28,17	51,06
Південний польовий конвеєрний штрек гор. 593 м	316	28	85	25,23	44,75

Зміна планів запуску 2-ї північної лави блоку 11 ШУ Покровське
восени 2024 року

Графік монтажу лави



- Відсутність можливості проведення робіт протягом 8 днів (у період з 21.09 по 04.10) у зв'язку з перебоєм електропостачання
- Уповільнення темпів монтажу з 6 до 5 секцій на добу, переведення ГРОЗ з МДО у видобуток, заміщення робітників МДО – прохідниками
- Погіршення гірничо-геологічних умов у монтажному хіднику – інтенсивне здимання підшви, деформація арок кріплення

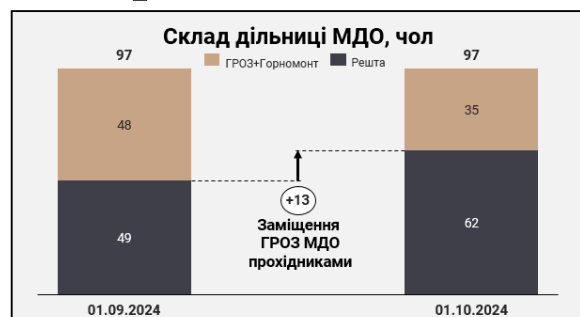


Рис. 1. Схема заходів з реалізації резерву приросту обсягу вуглевидобутку по 2-й північній лаві блоку 11

Більшість сучасних технічних рішень щодо кондиціювання підземної атмосфери спрямовані на зниження температури повітря в гірничих виробках [18; 19] шляхом теплообміну між повітрям і холодоносієм як останнього може

бути вода, крига, аміак, різного роду вуглеводневі легко киплячі сполуки тощо.

Це складні матеріаломісткі конструкції, що споживають значну кількість електроенергії [20; 21]. Підземні та поверхневі охолоджувальні

установки містять, як правило, компресори трубопроводів, теплообмінників, регулювальних та автоматичних приладів. У процесі роботи вони повинні зніжувати температуру значних потоків повітря, що прямують до вибою, орієнтовно це 10...25 м³/с, що потребує значних витрат енергії, причому вміст вологи в повітрі не лімітується.

Перспективним, на наш погляд, може стати процес зниження вологовмісту в повітрі разом з його охолодженням. Це допомогло б наблизити оцінку умов роботи під землею до вимог, що є на поверхні [10]. Розглянемо сучасні способи зниження вмісту вологи в повітряному середовищі.

Останнім часом у світі інтенсивно проводять дослідження з вилучення вологи з атмосфери для отримання питної води. В основу роботи всіх дослідних та експериментальних установок покладено фундаментальну закономірність водяної пари, що міститься в повітрі, переходити до стану рідини та конденсуватись при досягненні так званої точки роси.

Індійські вчені випробували атмосферний вододобувний пристрій, що працює за парокомпресійним холодильним циклом [22]. У цьому циклі температура на вході у випарник підтримується на рівні нижче температури точки роси атмосферного повітря, що входить до пристрою. Так, волога, що міститься в повітрі, конденсується на змійовику й збирається. Кількість конденсату залежить від психрометричних умов повітря, що надходить. Температура повітря була близько 32 °С, і коли воно надходило до змійовика випарника, його температура знижувалася до 10 °С (температура

точки роси апарату). Оскільки температура точки роси апарату (10 °С) була значно нижчою за температуру точки роси ненасиченого вхідного повітря (18 °С), водяна пара, наявна в повітрі, конденсувалася й збиралася для подальшої обробки. Пристрої для отримання атмосферної води найбільш ефективні в жарких і вологих регіонах. Коли рівень вологості в атмосфері становить 56 %, екстрагується 8,3 мл/хв води, а коли рівень вологості в атмосфері становить 36 % – екстрагується 1,7 мл/хв.

В установці прямого повітряного охолодження компресор циркулює холодоагент через конденсатор, а розташований послідовно змійовик випарника охолоджує повітря навколо нього [23]. Це призводить до конденсації пари завдяки зниженню температури повітря до точки роси. Вентилятор із регульованою швидкістю продуває відфільтроване повітря через змійовик у теплоізований канал. Після того як температура повітря, що надходить у випарник, впадає до точки роси, краплі конденсуються на стінках водяного каналу та стікають у лоток.

У дослідній системі із замкнутим контуром вологе повітря рухає вентилятор, яким можна одночасно контролювати швидкість потоку [24]. Крапельна конденсація відбувається при проходженні гарячого вологого повітря вздовж холодної підкладки, на якій закріплено поліетиленову плівку, що сприяє краплинній конденсації. Поліетиленова фольга має статичний контактний кут приблизно 90°, кути контакту при насуванні краплі та відступі становлять близько 111° та 74° відповідно.

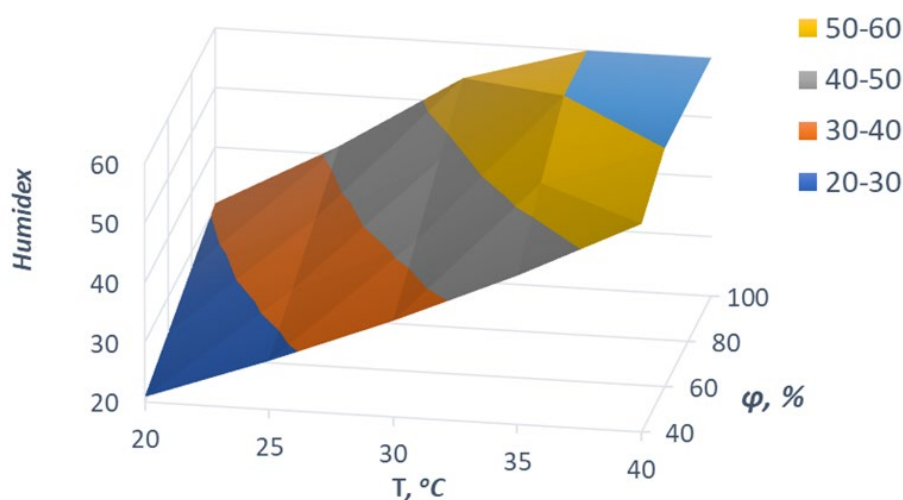


Рис. 2. Вплив температури T , °С та вологості ϕ , % повітря на робочому місці на величину мікрокліматичного індексу Humidex

Цікавою є прозора експериментальна установка, у якій використано композитний матеріал, що сорбує вологу, який поміщено на лоток із дрітної сітки [25]. У процесі адсорбції бічні вікна відкриваються у вечорі, і процес починається через різницю тиску пари між поверхнею композитного вологопоглинача та атмосферного повітря (меншою для композитного вологопоглинача). Цей процес продовжують до пізньої ночі для досягнення рівноважних умов, тобто коли тиск пари на поверхні адсорбенту стане таким самим, як в атмосферного повітря. Уранці бічні вікна закривають й установка піддається впливу сонячних променів для процесу регенерації. Залежно від підвищення температури композитного сорбувального наповнювача різниця тиску пари між поверхнею композитного матеріалу, що поглинув вологу, і повітрям внутрішнього простору коробки збільшується. Завдяки нахилу піддона для збирання води вода надходить у водомірний резервуар через сполучну трубку. Максимальна температура відновлення залежить від кількості доступного сонячного тепла.

Автономний комплекс для виділення води з атмосферного повітря [26] містить корпус у вигляді прозорого купола, оснащений вертикальною витяжною трубою, теплонакопичувач усередині купола, теплообмінник, що контактує з джерелом холоду, повітровід до теплообмінника, резервуар для осажденої води. Як джерело холоду використовують підземний охолоджувальний басейн. У денний час повітря, нагріте до 40...45 °C з вологовмістом 38...45 % додатково нагрівається під куполом до 50...55 °C і надходить у теплообмінник, де охолоджується до температури нижче точки роси. Вода по системі трубопроводів надходить у резервуар, а осушене атмосферне повітря – у витяжну трубу.

Досліджено роботу експериментальної установки для видобутку питної води шляхом використання атмосферної пари [27]. Установка містить компресор, конденсатор, розширювальний клапан та випарник, через який збирається вода. Як холодоагент у цьому дослідженні використовують R-22, для охолодження конденсатора встановлено витяжний вентилятор примусового типу. Воду збирали щодня протягом семи місяців, а її чистоту перевіряли експериментально. Результати цієї роботи показали, що виробництво води в середньому становить 20 л на день, а середня вартість її виробництва за літр становила 14...12 індійських рупій, що менше за долар.

Пристрій для одержання води з парів атмосфери [28] містить попарно встановлені

елементи, що конденсують, виконані у вигляді гофрованих аркушів з металу, на зовнішню поверхню яких нанесений шар гідрофільної речовини. Як джерело руху повітря використовують природні вітрові потоки. Тепло, що виділяється при конденсації, майже вільно проходить через тонкий шар гідрофільної речовини і шляхом теплопровідності металевго елемента приділяється в поза. Етажерне розташування елементів конденсації робить систему ефективною незалежно від напрямку швидкості вітру та конденсації парів на всіх площинах елементів, що конденсують. Накопичена рідина поступає у водовідвідний жолоб для збору води.

Проаналізовано результати вироблення води з мінімальною температурою 10 °C при охолодженні повітря на 8 °C нижче точки роси, середньої витраті повітря 400 м³/год, потужності компресора 1000 W [29]. Утворену в результаті конденсації водяної пари воду проаналізували на наявність важких металів, неорганічних іонів, NH₄⁺ та низки інших речовин. Результати порівнювали з рекомендаціями щодо стандартів питної води. Відібрано 64 проби води в різних кліматичних умовах, у різний час доби та протягом кількох сезонів. Жодна з виміряних хімічних речовин (за винятком нікелю та бензопірену в рідких пробах) не перевищувала стандарти для питної води. Хімічні елементи, що становили основну частину пристрою, як-от залізо, хром, молібден та алюміній у скрапленій воді не виявлені взагалі або в дуже маленьких кількостях (менш ніж 5 мкг/л).

Для обґрунтування комерційного використання методу вилучення води з повітря проведено комплексне дослідження якості води, що виробляється апаратом типу AWG [30]. Експерименти проведено в дуже забрудненому промисловому середовищі. 83 проби води AWG проаналізовані щодо 99 різних параметрів якості, включно з органічними, неорганічними та мікробними забрудненнями. Два параметри – нікель (15 проб) та дихлорметан (2 проби) – спорадично перевищували стандарти питної води. Аміак був єдиним параметром, який постійно перевищував стандартні межі 0,5 мг/л (61 % проб, що належать до 47 країн) і навіть перевищував 1,5 мг/л. Результати показують, що навіть у районах, які вважаються надмірно забрудненими порівняно з природним середовищем, вода, що отримується з повітря за допомогою AWG, може вважатися придатною для пиття, за умови пильної уваги до дуже специфічних забруднювачів.

Узагальнення наведених даних показує, що в експериментальних і комерційних установках

реалізовано кілька різних конструктивних рішень з отримання води з повітря, у всіх використовують фазовий перехід вологи з газоподібного стану до рідкого – конденсація чи сорбція з використанням фізичного ефекту «точки роси». Отриманий конденсат має хімічні властивості, близькі до питної води, та відносно невелику собівартість. З погляду забезпечення комфортних мікрокліматичних умов праці осушенням повітря дослідження не проводили. Огляд відомих конструкцій указує на те, що застосовані технічні рішення не пристосовані до використання в гірничих виробках.

Розглянуто, як приклад, можливість комплексного забезпечення теплових та вологісних умов роботи прохідників поблизу вибоїв тупикових виробок. Для провітрювання такого типу гірничих виробок обладнують вентиляційні установки місцевого провітрювання. Вони містять установлений в основній виробці вентилятор, який подає повітря до циліндричної форми гнучкого, виготовленого зі штучної шкіри повітропроводу. Повітропровід прокладено до вибою тупикової виробки. Регулювання витрати повітря в установці здійснюють за допомогою направляючого апарата вентилятора, також зміненням числа обертів двигуна або встановленням додаткових регуляторів потоку в повітропроводі. Після провітрювання робочих місць, що розташовані поблизу вибою, вихідний струмінь повітря спрямовано у зворотному напрямку по тупиковій виробці до основної.

Для виконання поставленого завдання з осушення та охолодження повітря запропоновано використати процеси такої термодинамічної системи. Установка місцевого провітрювання, яка містить вентилятор і повітропровід, для видалення води з повітря, додатково оснащують умонтованим у повітропровід теплоізолюваним корпусом, у якому встановлено трубчастий теплообмінник, на вході до труб якого приєднано дросель, а на виході – компресор, який, своєю чергою, з'єднаний з радіатором, а той – з дроселем. Крім того, у нижній частині корпусу зроблено жолоб, поєднаний трубою з краном до резервуара конденсованої води.

Елементи ланцюга «трубчастий теплообмінник – компресор – радіатор – дросель» утворюють герметичну систему, заповнену холодоагентом, який має температуру кипіння, значно нижчу від температури повітря у виробці. Холодоагент циркулює під дією компресора до встановленого в повітряному струмені гірничої виробки радіатора, а потім до встановленого на вході до труб теплообмінника дроселя.

Охолодження теплообмінника відбувається завдяки циркуляції в його трубках рідкого холодоагенту, який має низьку відносно температури повітря в повітропроводі температуру кипіння, тому відбувається його кипіння в трубках, яке супроводжується поглинанням тепла з повітря. Газоподібний холодильний агент із випарника відсмоктується компресором. У компресорі відбувається стиск холодоагенту до високого тиску та нагнітання його в радіатор. Відбувається конденсація стиснених парів, у процесі конденсації тепло з радіатора передається повітрю гірничої виробки, що обтікає його, і воно розсіюється в навколишньому середовищі. Під дією високого тиску рідкий холодоагент надходить через дросель у випарник, з метою зменшення тиску та регулювання потоку. У випарнику рідкий холодоагент під низьким тиском поглинає теплоту з внутрішнього об'єму теплообмінника та перетворюється на газ низького тиску. Компресор знову всмоктує холодоагент, цикл повторюється.

Осушення повітря забезпечують, пропускаючи повітря через теплообмінник, який встановлено в теплоізолюваному корпусі. Теплова ізоляція корпусу обмежує доступ тепла зовні до теплообмінника та покращує вилучення тепла з повітря, що рухається повітропроводом. В охолоджену нижче точки роси повітрі відбувається конденсація водяних крапель, які осідають на стінках корпусу та трубах теплообмінника, великі краплі під дією гравітації стікають до жолоба. Накопичена вода стікає при відкритому крані до резервуару, а з нього відбирається споживачами.

Регулювання інтенсивності охолодження повітря в теплообміннику забезпечується завдяки зміні тиску або витраті холодоагенту компресором. У результаті змінюється температура трубок теплообмінника і, відповідно, швидкість конденсації води з повітря.

Конструктивно установка для осушення повітря у вибої тупикової виробки та основні процеси в ній мають такий вигляд (рис. 3).

Для регулювання темпів осушення повітря та вилучення з нього води використовували такі прийоми, як зміна витрати вентилятора 1 у бік збільшення або зменшення. Також керували тиском у ланцюгу: «теплообмінник 4 – компресор 7 – радіатор 6 – дросель 5» що визначало температуру труб у теплообміннику 4 і, відповідно, ступінь осушення повітря. Сконденсована волога з нижньої частини корпусу 3 відводилася через трубку з краном 9 до резервуару 10.

Результати розрахунків показали, що коли до вентилятора 1 з витратою $500 \text{ м}^3/\text{хв}$, надходило

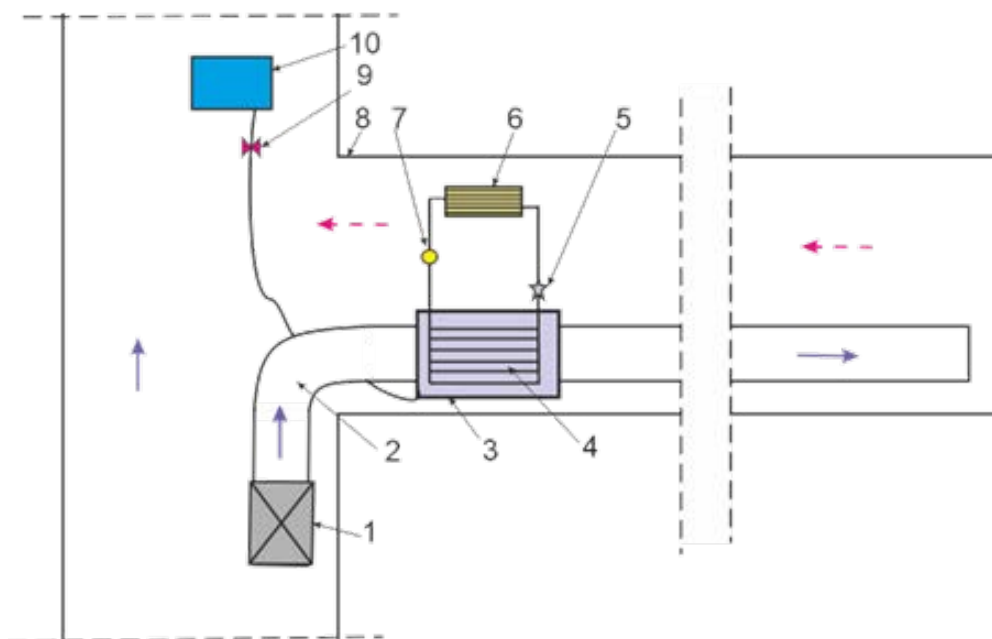


Рис. 3. Схема установки для осушення повітря в тупиковій гірничій виробці:
1 вентилятор; 2 – повітропровід; 3 – теплоізольований корпус; 4 – трубчастий
теплообмінник; 5 – дросель; 6 – радіатор; 7 – компресор; 8 – гірнича виробка;
9 – трубка з краном; 10 – резервуар

повітря з температурою 24 °С і відотною вологістю 93 %, значення *Humidex* дорівнювало 37,66, що є небезпечним. Повітропроводом 2 це повітря поступало до теплоізольованого корпусу 3, де під дією такого, що мав температуру +2 °С теплообмінника 4 повітря охолоджувалося до 12 °С. Відповідно вологість повітря, що залишалось у повітропроводі 2, зменшилася до 55 %. Так, абсолютний уміст пароподібної вологі знизився з 20 г/м³ до 11 г/м³. Решта вологі була сконденсована й стікала до жолоба в нижній частині корпусу 3. Масове надходження конденсату становило 4 500 г/хв, або 330 кг/год. Охолоджене повітря нагрівалося на шляху до вибою внаслідок теплообміну з повітрям, що оточує повітропровід, однак вологовміст в ньому не збільшувався. У привибійному просторі температура повітря становила 20 °С, а *Humidex* = 12,5. У такий спосіб забезпечено комфортні мікрокліматичні умови роботи прохідників.

Установка містить вентилятор 1, підключений до повітропроводу 2, що налічував 20-метрові секції гнучкої вентиляційної труби. Між двома секціями встановлено металевий корпус 3, покритий пінопластовою теплоізоляцією. У корпусі 3 вмонтовано трубчастий теплообмінник 4, який містив пучок мідних, об'єднаних у паралельну систему трубок, для руху та википання холодоагенту. Рідкий холодоагент до теплообмінника 4 надходив з дроселя

5, у якому редукувався тиск рідини, що конденсувалася у радіаторі 6 під дією компресора 7. У компресорі 7 стискали газоподібний холодоагент, що надходив з теплообмінника 4, до необхідного для конденсування стану. Приховану теплоту конденсування з радіатора 6 поглинало повітря гірничої виробки 8 і вона розсіювалась у зовнішньому просторі. У нижній частині корпусу 3 створено жолоб до якого стікає конденсована вода, із жолоба конденсат надходив до трубки 9 з краном. Після відкриття крана вода надходила з трубки 9 до резервуара 10, звідки її відбирали користувачі.

Підтримання низької температури в теплообміннику забезпечували циркуляцією зі змінною фазового стану холодоагенту в ланцюгу: «теплообмінник 4 – компресор 7 – радіатор 6 – дросель 5». Як холодоагент використовували пожежовибухобезпечну, нетоксичну, екологічну низькотемпературну рідину типу R-507a. Вона послідовно переводилася від рідкого, з низьким тиском, у теплообміннику 4 до рідинного стану з високим тиском у радіаторі 6. Надлишкова теплота конденсування розсіювалась у повітряному просторі гірничої виробки 8.

Наданий приклад продемонстрував технічну можливість управління станом середовища на робочих місцях прохідників гірничих виробок, змінюючи вміст вологі в потоці повітря, що подають до вибоїв. Завдяки регулюванню не

тільки температури повітря, а і його вологості, суттєво, майже втричі покращено показники комфортності праці (Humidex з 37,66 до 12,5) у просторі поблизу вибою. Цей підхід до кондиціювання робочого середовища дає змогу наблизити умови праці гірників до таких, що є на поверхні.

Технологічну схему покращення мікроклімату в очисній виробці наведено на рис. 4.

Удосконалення схеми осушення й охолодження повітря полягає в заміні або доповненні

чилерного типу установки на відкритий теплообмінник, що використовує скраплений азот – відхід від підготовки металургійного кисневого дуття (рис. 5); схему відкритого теплообмінника наведено на рис. 6.

Реалізація таких технічних рішень потребує використання додаткового обладнання та споживання енергії, що призводить до здорожчання продукції гірництва. Однак вилучення води із шахтного повітря може забезпечити певні економічні переваги.

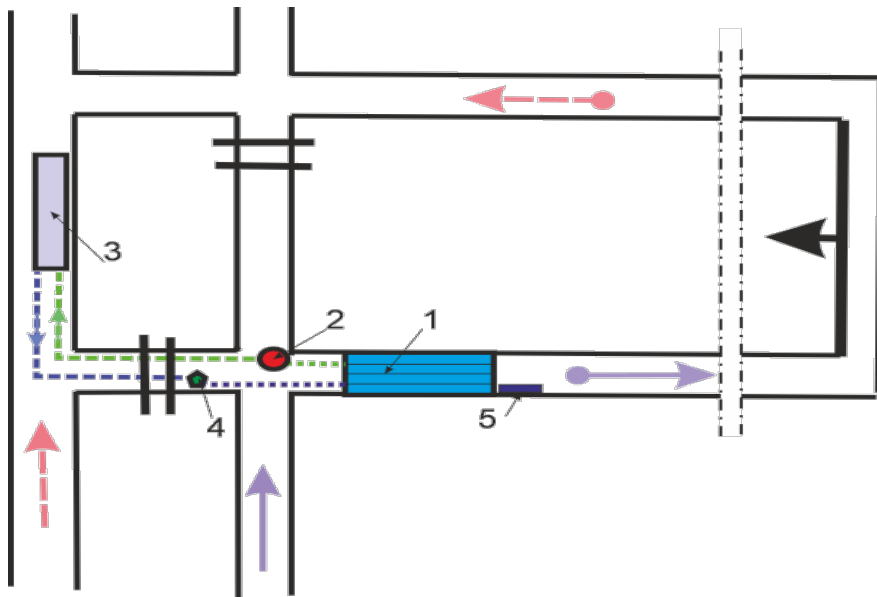


Рис. 4. Охолодження і осушення повітря на виїмковій ділянці
1 – теплообмінник; 2 – компресор; 3 – радіатор; 4 – дросель; 5 – резервуар

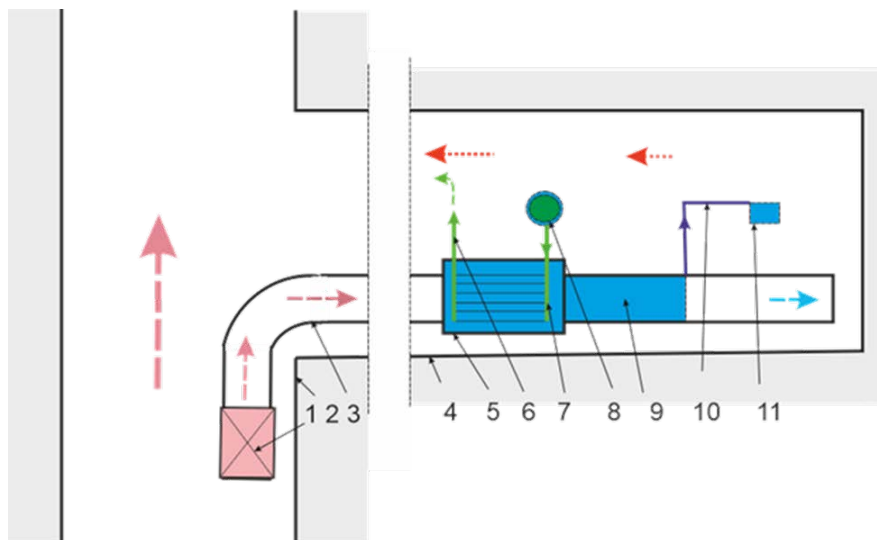


Рис. 5. Покращення мікроклімату у вибої з використанням скрапленого азоту
1 – ВМП; 2, 4 – підготовчі виробки; 3 – вентиляційна труба;
5 – теплообмінник; 6 – дренаж газоподібного азоту; 7 – подання рідкого азоту; 8 – криогенна ємність; 9 – зона «дощу»; 10 – водопровід; 11 – ємність

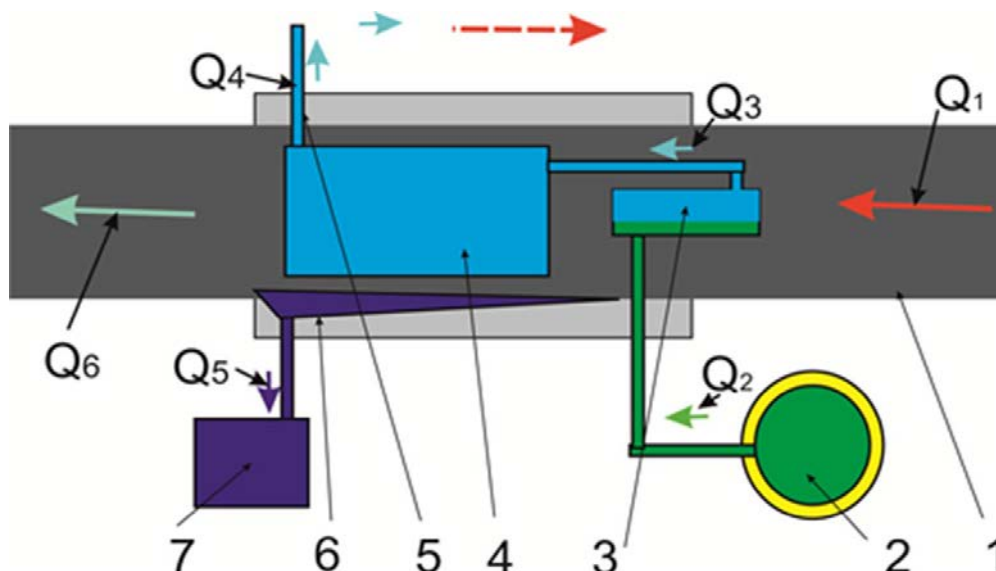


Рис. 6. Схема відкритого теплообмінника

1 – вентиляційна труба; 2 – криогенна ємність; 3 – випарювач; 4 – теплообмінник; 5 – дренаж азоту; 6 – водозбірник; 7 – ємність для води; Q1–Q6 – напрями теплових потоків

За даними статистики, середньої потужності глибока вугільна шахта витрачає на провітрювання виробок понад $350 \text{ м}^3/\text{с}$ повітря. Енергія вентиляторів головного провітрювання витрачається на переміщення виробками не тільки сухого повітря, а й водяної пари.

Схему відкритого теплообмінника наведено на рис. 6.

Атмосфера протяжних гірничих виробок протягом року має майже стабільну температуру та значну відносну вологість, яка становить близько 80 %, а на вентиляційних горизонтах наближається до 100 %. Уміст води у вигляді пари в такому повітрі становить близько $17 \text{ г}/\text{м}^3$ за температури повітря 20°C ; за збільшення температури повітря до 30°C такий показник зростає до $30 \text{ г}/\text{м}^3$.

Ураховуючи середню площину поперечного перерізу виробок шахти приблизно 12 м^2 , а їх сумарну протяжність близько 150 000 м на загальну масу води, що міститься в об'ємі шахтної вентиляційної мережі, за вологовмісту $20 \text{ г}/\text{м}^3$, можна оцінити в 36 000 кг. Використовуючи технології вилучення води з повітря, можна скоротити баластну масу в повітрі не менш ніж удвічі та позбутися необхідності переміщення виробками цієї додаткової маси. Це забезпечить зменшення витрат енергії на вентиляцію шахти завдяки переведенню режиму роботи вентиляторів на більш раціональні характеристики. Крім того, зниження вмісту води та пов'язане із цим скорочення густини осушеного повітря на струмені, що виходить із шахти, покращує

умови вентиляції шахти завдяки покращенню природної тяги, яка сприяє роботі вентиляторів.

Вода, що використовується при бурінні порід, нагнітанні у пласт, пилопридушенні при виїмці та транспортуванні гірничої маси, пожежогасінні та інших технологічних процесах, повинна відповідати питним нормам. Ціна води, яку підприємства вимушені закуповувати в зовнішніх постачальників, останніми роками стрімко зростає. Вона стає вагомим складником у структурі собівартості продукції шахт. Світовий досвід робіт з вилучення вологи з повітря [28–31] свідчить про високі якісні показники отриманих сконденсованих розчинів, які наближені до питної води. Тому надійне вилучення з повітря власної води доброго ґатунку обійдеться набагато дешевше покупної. Як показують наведені вище розрахунки, видобуток води може бути достатнім для забезпечення технологічних потреб шахти, а також з'являється перспектива використання її як комерційного продукту. Параметри заходів визначали на основі реальних даних активних і запроєктованих вугільних блоків Шахтоуправління «Покровське» [32; 33]

Висновки. Зі збільшенням глибини розробки родовищ корисних копалин зростає температура гірничого масиву й суттєво погіршується тепловий та вологісний стан повітря у виробках. Проблема забезпечення комфортних і безпечних умов праці шахтарів набуває дедалі більшої актуальності. Наявні, основані на температурних показниках нормативі мікроклімату для підземних робочих місць унаслідок

технічних та економічних причин негативно відрізняються від прийнятих для поверхні.

Авторами запропоновано покращувати мікрокліматичні умови на підземних робочих місцях шляхом вилучення вологи, що міститься в шахтному повітрі у вигляді пари. Розглянуто варіант осушення повітря при проведенні тупикової виробки. Результати розрахунків показали, що завдяки осушенню повітря, яке подають за допомогою вентилятора місцевого провітрювання з температурою 24 °С, а потім охолоджують нижче точки роси і доставляють до вибою з температурою 20 °С, мікрокліматичний показник *Humidex* зменшується з дискомфортного рівня 37,7 до комфортного – 12,5.

Додатковими перевагами запропонованого способу нормалізації стану рудникової атмосфери на робочих місцях є отримання із шахти водного ресурсу досить високої якості. У повітрі

глибокої шахти середньої потужності може міститись у вигляді пари кілька десятків тонн води. Вилучення частини такого ресурсу дасть змогу зменшити витрати на придбання води для технологічних потреб та на пожежогасіння.

Вилучення вологи із шахтного повітря дає змогу зменшити його густину і, відповідно, витрати на провітрювання мережі гірничих виробок вентиляторами головного провітрювання та отримати певний екологічний ефект.

Узагальнення отриманих результатів дослідження дало змогу зробити висновок, що запропонований спосіб нормалізації умов праці гірників у глибоких шахтах за комплексного підходу, який містить кондиціювання температури з одночасним вилученням води, а також покращенням режиму вентиляції гірничих виробках забезпечує значні переваги з погляду промислової санітарії, технології та економіки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Abramowicz A., Rahmonov O., Chybiorz R. Environmental Management and Landscape Transformation on Self-Heating Coal-Waste Dumps in the Upper Silesian Coal Basin. *Land*. 2021. № 10(1). P. 23. <https://doi.org/10.3390/land10010023>.
2. Ahamed P. U., Mohamed Ibraheem M. P., Syed Basith K. M., Mohammed Azharudeen J., Kiyasudeen P. A. Performance Analysis of Atmospheric Water Extraction by Refrigerator Cum Air Conditioner. *International Journal of Advanced Research*. 2023. № 3(3). P. 2581–9429. <https://doi.org/10.48175/IJAR SCT-14341>.
3. Almrid A. A., Alanabi F. M. Experimental study of atmospheric water generator under Libyan climate. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2021. № 12(5). P. 38–44. <https://doi.org/10.34218/IJMET.12.5.2021.005>.
4. Bhukya P., Naick B., Enhancing ventilation fan performance in underground coal mines: a hybrid approach. *Electrical Engineering*. 2024. Vol. 106. P. 4969–4992. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02268-0>.
5. Bohomaz O., Kostenko V., Hlushko I., Liashok N., Kostenko T. Use of solid mining waste to improve water retention capacity of loamy soils. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. Vol. 17(4). P. 29–34. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.029>.
6. Чернов В. О., Макаров А. А. Автономний комплекс для виділення води з атмосферного повітря. Патент на корисну модель 49865. Україна. 2010.
7. Dao V. C., Le T. D., Vu T. T., Nguyen H. C. Research, Calculation and Proposal of Ventilation Solution for Duong Huy Coal Mine when Mining Down to -250 m Depth. *Inżynieria Mineralna*. 2021. Vol. 1(2). <https://doi.org/10.29227/IM-2021-02-49>
8. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Україна. 1999.
9. Inbar O., Gozlan I., Ratner S., Aviv Y., Sirota R., Avisar D. Producing Safe Drinking Water Using an Atmospheric Water Generator (AWG) in an Urban Environment. *Water*. 2020. Vol. 12(10). P. 2940. <https://doi.org/10.3390/w12102940>
10. Kaplan A., Ronen-Eliraz G., Ratner S., Aviv Y., Wolanov Y., Avisar D. Impact of industrial air pollution on the quality of atmospheric water production. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 325. 121447. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121447>
11. Kocsis K.C., Sunkpal M. Identifying and controlling heat-induced health and safety problems in underground mines. *Mining Engineering*. 2017. Vol. 69 (9). P. 53–60. <https://doi.org/10.19150/me.7745>
12. Коняхін Г. Ф., Верещагін В. Л. Пристрій для отримання води з атмосферних парів. Патент на корисну модель 48999. Україна. 2010
13. Kostenko V., Zavialova O., Chepak O., Pokalyuk V. Mitigating the adverse environmental impact resulting from closing down of mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Vol. 12(3). P. 105–112. <https://doi.org/10.15407/mining12.03.105>
14. Kostenko V., Zavialova O., Novikova Y., Bohomaz O., Krupka Y., Kostenk, T. Substantiating the parameters of quickly erected explosion-proof stopping. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. Vol. 37(4). P. 143–153. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.2.10>

15. Kostenko V., Bohomaz O., Kostenko T., Berezovskyi A. Mechanism of coal aerosol explosion development in an experimental mine working. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 2023. Vol. 38(2). P. 135–142. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.4.12>
16. Kumar M., Yadav A., Mehla N. Water generation from atmospheric air by using different composite desiccant materials. *International Journal of Ambient Energy*. 2017. Vol. 40(4). P. 343–349. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1392350>
17. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Лапшина Д. О. Використання шахтних вод для нормалізації мікроклімату в гірничих виробках глибоких шахт. *Вісник Криворізького національного університету*. 2015. Вип. 40. С. 27–33.
18. Milosevic D., Dunjić J., Stojanović V. Investigating Micrometeorological Differences between Saline Steppe, Forest-steppe and Forest Environments in Northern Serbia during a Clear and Sunny Autumn Day. *Geographica Pannonica*. 2020. Vol. 24. P. 176–186. <https://doi.org/10.5937/gp24-25885>.
19. Nguyen Q. V., Do T. N., Nguyen T. V., Nguyen M. V. Le H. N. Solutions to improve microclimate conditions for longwall in Mong Duong coal mine (in Vietnamese). *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2021. Vol. 62(5a). P. 28–35. [https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62\(5a\).04](https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62(5a).04).
20. НПАОП 10.0-1.08-25. Правила безпеки ведення гірничих робіт у вугільних шахтах. [На заміну НПАОП 10.0-1.01-10; чинний від 2025-09-05]. Вид. офіц. Київ : 144 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1145-25#>.
21. OECD Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris. 2019. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
22. Quan T.T., Łuczak R., Życzkowski P. Climatic hazard assessment in selected underground hard coal mines in Vietnam. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*. 2019. Vol. 2(2). P. 155–163. <https://doi.org/10.29227/IM-2019-02-69>.
23. Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M., Piergies K. Current Ventilation Problems in Hard Coal Mines. *“Wydawnictwa AGH”*, 2017. 156 p.
24. Szlązak N., Obracaj D., Swolkień J. An Evaluation of the Functioning of Cooling Systems in the Polish Coal Mine Industry. *Energies*. 2018. Vol. 11. 2267. <https://doi.org/10.3390/en11092267>.
25. Teku K., Yadav J.S., Rao V.S., Raghu M., Kumar G.U. Experimental Analysis of Potable Water Generation using Humidified Air. *Research and Applications of Thermal Engineering*. 2021. Vol. 4(1). P. 1–9. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4638529>.
26. Wang K., Li Q., Wang J., Yang S. Thermodynamic characteristics of deep space: hot hazard control case study in 1010-m-deep mine. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 28. 101656. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101656>.
27. Xue Y., Wang J., Xiao J. Bibliometric analysis and review of mine ventilation literature published between 2010 and 2023. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. e26133. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26133>.
28. Zhang C., Tang S. C., Li D. M., Xing J. J., Xu A. M., Li J. Experimental study of the heavy-duty working condition and intensified fatigue grade for the workmen under high temperature and great humidity environment. *Journal of safety and environment*. 2015. Vol. 15. P. 176–180.
29. Zhang J. G., Yang S. H., Suo C. Y. Research on effects of high temperature and high humidity environment on miners physiology and psychology. *China Safety Science Journal*. 2015. Vol. 25. P. 23–28.
30. Zheng S.-F., Eimann F., Philipp C., Fieback T., Gross U. Experimental and modeling investigations of dropwise condensation out of convective humid air flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 151. 119349. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119349>.
31. НПАОП 10.0-7.08-93. Настанова з проектування вентиляції вугільних шахт. Затверджено наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці № 131 від 20.12.1993. ДНАОП 1.1.30-6.09.93.
32. Безпека та гігієна праці у гірничодобувній галузі та вугільній промисловості в Україні. Міжнародна організація праці. Група технічної підтримки з питань гідної праці та Бюро МОП для країн Центральної та Східної Європи. Київ : МОП. 2018. 46 с.
33. Проєкт «Розкриття та підготовка запасів блоку №11 ПрАТ «ШУ «Покровське». Нове будівництво. с. Піщане, Донецької області. Управління проєктно-вишукувальних робіт ТОВ «ШСП № 3». Зі змінами 2021 р.
34. Проєкт «Розкриття та підготовка запасів блоків № 12 ПрАТ «ШУ «Покровське». Нове будівництво. с. Зелене, Донецької області. Управління проєктно-вишукувальних робіт ТОВ «ШСП № 3». Зі змінами 2022 р.

REFERENCES:

1. Abramowicz, A., Rahmonov, O., & Chybiorz, R. (2021). Environmental Management and Landscape Transformation on Self-Heating Coal-Waste Dumps in the Upper Silesian Coal Basin. *Land*, 10(1), 23. <https://doi.org/10.3390/land10010023>
2. Ahamed, P. U., Mohamed Ibraheem, M. P., Syed Basith, K. M., Mohammed Azharudeen, J., Kiyasudeen, P. A. (2023). Performance Analysis of Atmospheric Water Extraction by Refrigerator Cum Air Conditioner. *International Journal of Advanced Research*, 3(3), 2581–9429. <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-14341>
3. Almrud, A. A., & Alanabi, F. M. (2021). Experimental study of atmospheric water generator under Libyan climate. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 12(5), 38–44. <https://doi.org/10.34218/IJMET.12.5.2021.005>
4. Bhukya, P., & Naick, B. (2024). Enhancing ventilation fan performance in underground coal mines: a hybrid approach. *Electrical Engineering*, 106, 4969–4992. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02268-0>
5. Bohomaz, O., Kostenko, V., Hlushko, I., Liashok, N., & Kostenko, T. (2023). Use of solid mining waste to improve water retention capacity of loamy soils. *Mining of Mineral Deposits*, 17(4), 29–34. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.029>
6. Chernov, V. O., & Makarov, A. A. (2010). Avtonomnyy kompleks dlya vydilennya vody z atmosfernoho povitrya. [Autonomous complex for release of water from atmospheric air]. Patent for a utility model 49865, Ukraine [in Ukrainian].
7. Dao, V. C., Le, T. D., Vu, T. T., & Nguyen, H. C. (2021). Research, Calculation and Proposal of Ventilation Solution for Duong Huy Coal Mine when Mining Down to -250 m Depth. *Inżynieria Mineralna*, 1(2). <https://doi.org/10.29227/IM-2021-02-49>
8. DSN 3.3.6.042-99: Sanitarni normy mikroklimatu vyrobnychkh prymishchen [Sanitary norms of the microclimate of industrial premises]. (1999) Ukraine [in Ukrainian].
9. Inbar, O., Gozlan, I., Ratner, S., Aviv, Y., Sirota, R., Avisar, D. (2020). Producing Safe Drinking Water Using an Atmospheric Water Generator (AWG) in an Urban Environment. *Water*, 12(10), 2940. <https://doi.org/10.3390/w12102940>
10. Kaplan, A., Ronen-Eliraz, G., Ratner, S., Aviv, Y., Wolanov, Y., Avisar, D. (2023). Impact of industrial air pollution on the quality of atmospheric water production. *Environmental Pollution*, 325, 121447. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121447>
11. Kocsis, K. C., & Sunkpal, M. (2017): Identifying and controlling heat-induced health and safety problems in underground mines. *Mining Engineering*, 69(9), 53–60. <https://doi.org/10.19150/me.7745>
12. Konyakhin, H. F., Vereshchahin, V. L. Prystriy dlya oderzhannya vody z pariv atmosfery [A device for obtaining water from atmospheric vapors]. (2010). Patent for a utility model 48999. Ukraine [in Ukrainian].
13. Kostenko, V., Zavalova, O., Chepak, O., & Pokalyuk, V. (2018). Mitigating the adverse environmental impact resulting from closing down of mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, 12(3), 105–112. <https://doi.org/10.15407/mining12.03.105>
14. Kostenko, V., Zavalova, O., Novikova, Y., Bohomaz, O., Krupka, Y., & Kostenko, T. (2022). Substantiating the parameters of quickly erected explosion-proof stopping. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 37(4), 143–153. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.2.10>
15. Kostenko, V., Bohomaz, O., Kostenko, T., & Berezovskyi, A. (2023). Mechanism of coal aerosol explosion development in an experimental mine working. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 38(2), 135–142. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.4.12>
16. Kumar, M., Yadav, A., & Mehla, N. (2017). Water generation from atmospheric air by using different composite desiccant materials. *International Journal of Ambient Energy*, 40(4), 343–349. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1392350>
17. Lapshyn, O. Ye., Lapshyn, O. O., & Lapshyna, D. O. (2015). Vykorystannya shakhtnykh vod dlya normalizatsiyi mikroklimatu v hirnychkykh vyrobkakh hlybokykh shakht [The use of mine waters to normalize the microclimate in mining workings of deep mines]. *Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu*, 40, 27–33 [in Ukrainian].
18. Milosevic, D., Dunjić, J., & Stojanović, V. (2020). Investigating Micrometeorological Differences between Saline Steppe, Forest-steppe and Forest Environments in Northern Serbia during a Clear and Sunny Autumn Day. *Geographica Pannonica*, 24, 176–186. <https://doi.org/10.5937/gp24-25885>
19. Nguyen, Q. V., Do, T. N., Nguyen, T. V., Nguyen, M. V. Le, H. N. (2021). Solutions to improve microclimate conditions for longwall in Mong Duong coal mine (in Vietnamese). *Journal of Mining and Earth Sciences*, 62(5a), 28–35. [https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62\(5a\).04](https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62(5a).04)

20. NPAOP 10.0-1.08-25. Pravyla bezpeky vedennia hirnychkyh robot u vuhilnykh shakhtakh. [Safety rules for mining operations in coal mines]. (2025). Na zaminu NPAOP 10.0-1.01-10; chynnyi vid 2025-09-05]. Vyd. ofits. Kyiv : 144 p. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1145-25#> [in Ukrainian]
21. OECD (2019). Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
22. Quan, T. T., Łuczak, R., & Życzkowski, P. (2019). Climatic hazard assessment in selected underground hard coal mines in Vietnam. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2(2), 155–163. <https://doi.org/10.29227/JM-2019-02-69>
23. Szlązak, N., Borowski, M., Obracaj, D., Swolkień, J., Korzec, M., & Piergies, K. (2017). Current Ventilation Problems in Hard Coal Mines, "Wydawnictwa AGH", 156 p.
24. Szlązak, N., Obracaj, D., & Swolkień, J. (2018). An Evaluation of the Functioning of Cooling Systems in the Polish Coal Mine Industry. *Energies*, 11, 2267. <https://doi.org/10.3390/en11092267>
25. Teku, K., Yadav, J.S., Rao, V.S., Raghu, M., & Kumar, G.U. (2021). Experimental Analysis of Potable Water Generation using Humidified Air. *Research and Applications of Thermal Engineering*, 4(1), 1–9. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4638529>
26. Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Yang, S. (2021). Thermodynamic characteristics of deep space: hot hazard control case study in 1010-m-deep mine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101656, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101656>
27. Xue, Y., Wang, J., & Xiao, J. (2024). Bibliometric analysis and review of mine ventilation literature published between 2010 and 2023. *Heliyon*, 10, e26133. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26133>
28. Zhang, C., Tang, S. C., Li, D. M., Xing, J. J., Xu, A. M., & Li, J. (2015). Experimental study of the heavy-duty working condition and intensified fatigue grade for the workmen under high temperature and great humidity environment. *Journal of safety and environment*, 15, 176–180.
29. Zhang, J. G., Yang, S. H., & Suo, C. Y. (2015). Research on effects of high temperature and high humidity environment on miners physiology and psychology. *China Safety Science Journal*, 25, 23–28.
30. Zheng, S.-F., Eimann, F., Philipp, C., Fieback, T., Gross, U. (2020). Experimental and modeling investigations of dropwise condensation out of convective humid air flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 151, 119349. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119349>.
31. NPAOP 10.0-7.08-93. Nastanova z proektuvannia ventyliatsii vuhilnykh shakht. [NPAOP 10.0 7.08-93. Guidelines for the design of ventilation systems in coal mines] (1993). Zatverdzheno nakazom Derzhavnoho komitetu Ukrainy z nahliadu za okhoroноu pratsi № 131 vid 20.12.1993. DNAOP 1.1.30-6.09.93 [in Ukrainian].
32. Bezpeka ta hihiena pratsi u hirnychodobuvnii haluzi ta vuhilnii promyslovosti v Ukraini [Occupational safety and health in the mining and coal industries in Ukraine] (2018). *Mizhnarodna orhanizatsiia pratsi. Hrupa tekhnichnoi pidtrymky z pytan hidnoi pratsi ta Biuro MOP dlia krain Tsentralnoi ta Skhidnoi Yevropy*. Kyiv : MOP. 46 p. [in Ukrainian].
33. Proiekt "Rozkryttia ta pidhotovka zapasiv bloku № 11. PrAT "ShU "Pokrovske". Nove budivnytstvo. s. Pishchane, Donetskoi oblasti. Upravlinnia proiektно-vyshukuvalnykh robot TOV "ShSP № 3". Zi zminamy 2022 r. [Project "Opening and preparation of reserves of blocks No. 12 of PJSC "ShU "Pokrovske"] (2021). New construction. Zelene village, Donetsk region. Department of design and survey works by LLC "ShSP No. 3." With changes in 2022 [in Ukrainian].
34. Proiekt "Rozkryttia ta pidhotovka zapasiv bloku № 12. PrAT "ShU "Pokrovske". Nove budivnytstvo. s. Zelene, Donetskoi oblasti. Upravlinnia proiektно-vyshukuvalnykh robot TOV "ShSP № 3". Zi zminamy 2022 r. [Project "Opening and preparation of reserves of blocks No. 12 of PJSC "ShU "Pokrovske"] (2021). New construction. Zelene village, Donetsk region. Department of design and survey works by LLC "ShSP No. 3." With changes in 2022 [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 622.1:622.834

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-23>

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ОЧИСНИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ НА ЗЕМНУ ПОВЕРХНЮ ЗА ДАНИМИ МАРКШЕЙДЕРСЬКИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Назаренко Валентин Олексійович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-7704-9270

Бруй Ганна Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-9527-8889

Панасюк Андрій Вікторович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри маркшейдерії

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: 0000-0001-7468-2022

Молокова Світлана Валеріївна,

викладач кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0002-5579-4656

Куницька Марина Сергіївна,

старший викладач кафедри маркшейдерії

Державний університет «Житомирська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-2649-0939

Наведено результати дослідження параметрів процесу зрушення земної поверхні над гірничими роботами шах Західного Донбасу. Автори використовували графоаналітичний метод дослідження геометричних параметрів зрушення, отриманих методом натурних маркшейдерських інструментальних вимірювань на спеціальних спостережних станціях. Запропоновано вдосконалити методику прогнозування зрушень та деформацій земної поверхні при відпрацюванні вугільних пластів довгими стовпами в напрямку вхрест простягання пласта. Розглянуті питання зміни параметрів зрушення земної поверхні під час повторної підробки. На прикладі натурних спостережень за зрушенням земної поверхні в Західному Донбасі показано, що вони значно відрізняються від умов первинної підробки. Установлено, що в разі відпрацювання пластів довгими стовпами хрест простягання мульда зрушення в плані приймає «грушоподібну», а не еліптичну форму, через невідповідності напівмульд у головних перерізах за простяганням у зонах падіння й повстання пласта. Відмінність коефіцієнтів, що характеризують підробленість земної поверхні в основних перетинах по простягання на ділянці «плоського дна» призводить до поступового зростання максимального осідання в бік повстання пласта. Істотна відмінність коефіцієнтів у зонах з боку падіння та повстання пласта призводить до зміни характеру розподілу зрушень та деформацій у межах напівмульди.

Установлені відмінності параметрів зрушення земної поверхні при первинній і повторній підробках властиві умовам підробки спостережної станції № 7. Але вони дають змогу зробити висновок, що подібні відмінності мають місце й вони настільки істотні, що докорінно змінюють представлення про закономірності зрушення земної поверхні при веденні очисних робіт в умовах порушеного гірничими роботами породного масиву. Це, своєю чергою, указує на необхідність проведення системних досліджень процесу зрушення земної поверхні в Західному Донбасі з метою встановлення параметрів зрушення при повторній і наступних підробках.

Ключові слова: підземні гірничі роботи, земна поверхня, мульда осідання, деформації, маркшейдерські інструментальні вимірювання.

Nazarenko Valentin, Brui Hanna, Panasiuk Andrii, Molokova Svitlana, Kunytska Maryna. Improvement of the methodology for predicting the impact of mining cleaning works on the earth's surface using data from surveying instrumental measurement

The results of a study of the parameters of the earth surface displacement process above mining works in the Western Donbas are presented. The authors used a graphoanalytical method to study the geometric parameters of displacement obtained by field surveying instrumental measurements at special observation stations. It is proposed to improve the methodology for predicting displacements and deformations of the earth's surface when mining coal seams with long pillars in the direction of the cross-strike of the seam. The issues of changes in the parameters of earth surface displacement during repeated mining are considered. Using the example of field observations of earth surface displacement in the Western Donbas, it is shown that they differ significantly from the conditions of primary mining. It has been established that in the case of longwall mining, the cross-section of the displacement mould takes on a "pear-shaped" rather than an elliptical form due to the mismatch of the half-moulds in the main cross-sections along the strike in the dip and rise zones of the seam. The difference in the coefficients characterizing the deformation of the earth's surface in the main cross-sections along the strike in the "flat bottom" area leads to a gradual increase in the maximum subsidence towards the rise of the seam. A significant difference in the coefficients in the zones on the dip and rise sides of the stratum leads to a change in the nature of the distribution of shifts and deformations within the half-moulds.

The established differences in the parameters of the earth's surface shift during primary and secondary undermining are characteristic of the conditions of undermining at observation station No. 7. However, they allow us to conclude that such differences do exist and are so significant that they radically change our understanding of the patterns of earth surface displacement during mining operations in rock masses disturbed by mining. This, in turn, points to the need for systematic research into the process of earth surface displacement in the Western Donbas in order to establish the parameters of displacement during repeated and subsequent undermining.

Key words: underground mining works, earth surface, subsidence basin, deformations, surveying instrumental measurements.

Вступ. Сучасні технології видобутку корисних копалин дають змогу відпрацьовувати пологі вугільні пласти лавами за напрямом падіння (повстання). Дослідження зрушення земної поверхні при відпрацюванні довгих виїмкових стовпів ухрест простягання показують, що на поверхні утворюється мульда зрушення, характер розподілу деформацій, у якій відрізняється від випадку відпрацювання лав за простяганням. Це пояснюється значним перепадом глибин ведення гірничих робіт у межах однієї очисної виробки (зміна глибини залежить від кута падіння пласта, що розробляється, і довжини виїмкового стовпа). У нормативній методиці визначення очікуваних зрушень та деформацій земної поверхні [1] варіант відпрацювання лав хрест простягання не розглядається, а розрахунки деформацій, виконані за традиційною схемою, можуть призвести до суттєвих похибок прогнозування. Розглянемо наведену в «Правилах підробки...» [1] методику розрахунку очікуваних зрушень для умов відпрацювання вугільних пластів довгими стовпами вхрест простягання.

Методи та методики дослідження. Під час виконання роботи застосовано графоаналітичний метод дослідження геометричних параметрів зрушення земної поверхні над очисними виробками шахт Західного Донбасу, отриманих методом натурних маркшейдерських інструментальних вимірювань на спеціальних спостережних станціях.

Результати графоаналітичних досліджень. Очікувані зрушення та деформації

розраховуються в межах напівмульд: за падінням – L_1 , за повстанням – L_2 та за простяганням – L_3 . Значення довжин напівмульд визначаються графічно на вертикальних розрізах, відповідних перерізам мульди. Напівмульди L_1 , L_2 обмежені з боку виробленого простору лініями, що проведені під кутами ψ_1 , ψ_2 , з боку масиву – кутами ϕ_0 , β_0 , γ_0 ; межі напівмульди L_3 визначаються кутами ϕ_0 , δ_0 та γ_0 (рис. 1). При повній підробці в напрямку вхрест простягання пласта (коефіцієнт, що характеризує підробленість земної поверхні вхрест простягання $N_1 > 1$) у мульді зрушення між точками X_1 і X_2 формується плоске дно. До меж плоского дна примикають напівмульди L_1 та L_2 , довжини яких однозначно визначаються глибинами H_1 і H_2 відповідно.

Довжина напівмульди L_3 – відстань у головному перерізі на розрізі по простяганням між краєм мульди і точкою перетину із земною поверхнею лінії, проведеної від межі виробки під кутом γ_0 . Головним називається вертикальний перетин, що проходить через точку з максимальним осіданням земної поверхні.

Коефіцієнт N_2 , що характеризує підробленість земної поверхні за простяганням, має функціональну залежність від глибини залягання пласта в головному перерізі за простяганням і впливає на величину максимального осідання η_m :

$$\eta_m = m q_0 N_1 N_2 \cos \alpha, \quad (1)$$

де m – потужність пласта; q_0 – відносна величина максимального осідання; α – кут падіння пласта; N_1 та N_2 – коефіцієнти.

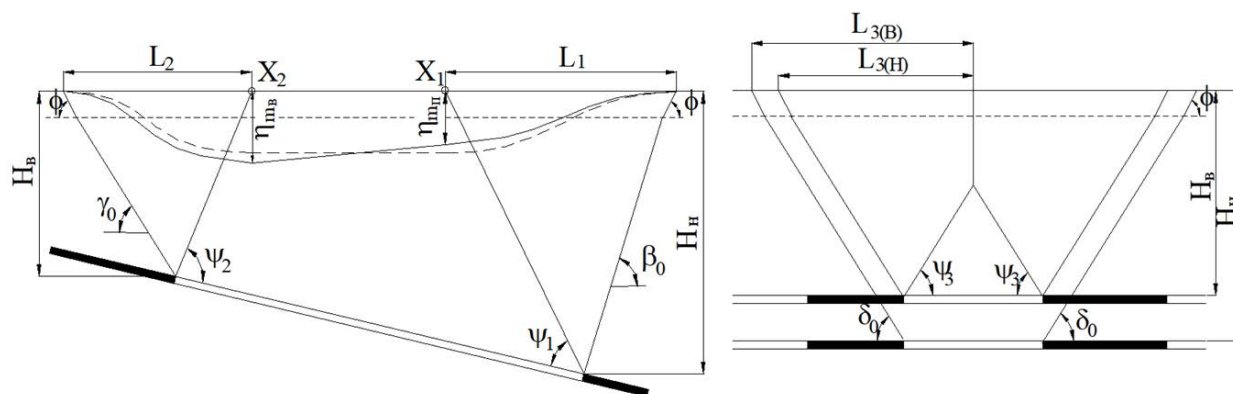


Рис. 1. Схема визначення довжин напівмульт для випадку відпрацювання лави вхрест простягання

Відповідно до вищесказаного виникає неоднозначність визначення величини η_m , тому що на ділянці плоского дна (X_1X_2) головного перерізу вхрест простягання змінюється глибина розробки, а отже, змінюються довжина напівмульди за простяганням L_3 і коефіцієнт N_2 . Показник η_m є одним з основних при розрахунку очікуваних зрушень та деформацій і неоднозначність його визначення неминуче призведе до неоднозначності прогнозування впливу гірничих робіт на земну поверхню. Ба більше, залежно від коефіцієнта N_2 вибираються відповідні функції розподілу зрушень і деформацій (типові криві) в напівмульді L_3 , а оскільки N_2 змінюється, то змінюватиметься і характер розподілу зрушень та деформацій на ділянці плоского дна. Це суперечить основним прийнятим положенням методики [1].

Напрошується висновок про непостійність осідань земної поверхні на ділянці плоского дна в головному перерізі вхрест простягання пласта при відпрацюванні пологих вугільних пластів лавами за повстанням (падінням). Це підтверджується даними натурних спостережень [2–4]. Для умов, що розглядаються, потрібно уточнити поняття «плоске дно», яке слід розглядати як ділянку мульди осідання, обмежену точками перетину земної поверхні лініями, проведеними від меж виробки під кутами ψ_1 та ψ_2 , і на якому осідання досягли максимально можливих (але не постійних) значень для даних умов підробки земної поверхні.

Максимальне осідання в i -му перерізі на ділянці X_1X_2 можна обчислити за формулою (1), підставивши значення коефіцієнта N_2 , що визначається відповідно до [1; 3], але залежно від глибини H_i для такого перерізу.

Простежимо розподіл осідань на ділянці X_1X_2 , досліджуючи залежність максимальних осідань η_m від глибини H_i . Відомо, що коефіцієнт N_2 пов'язаний із глибиною H виразом

$$N_2 = \sqrt{0,9 \frac{D_2}{H_i}}, \quad (2)$$

де D_2 – довжина лави в напрямку вхрест простягання пласта.

При постійному куті падіння пласта α на досліджуваній ділянці глибина H_i у точці на деякій відстані y від т. X_1 визначається як

$$H_i = H_B + y \sin \alpha. \quad (3)$$

Тоді формула (1) з урахуванням (2) та (3) запишеться у вигляді

$$\eta_{mi} = mq_0 N_1 \sqrt{0,9 \frac{D_2}{H_R + y \sin \alpha}} \cos \alpha. \quad (4)$$

Ураховуючи, що довжина напівмульди L_3 не постійна, для визначення зрушень і деформацій можна виділити три зони I, II і III (рис. 2).

Для зон I та II при розрахунку зрушень та деформацій пропонується використовувати напівмудли по простяганню відповідно $L_{1(n)}$ і $L_{2(b)}$. Довжини напівмудл визначаються в перерізах, що проходять через точки X_1 і X_2 . Так, буде враховано фактор зміни глибини за повстанням і падінням пласта. У кожній із цих зон матиме місце свій коефіцієнт, що характеризує підробленість земної поверхні: у зоні I – $N_{2(n)}$, у зоні II – $N_{2(b)}$ та відповідні значення максимального осідання: $\eta_{m(n)}$ и $\eta_{m(b)}$.

Район Центрального Донбасу

Розмір лави вхрест простяганню, D_2 , м	1000
Розмір лави за простяганням, D_1 , м	200
Кут падіння пласта, град.	10
Глибина над центром лави, м	300
Потужність пласта, м	0,8
Потужність наносів, м	25
Підробка первинна	
Лава з усіх боків обмежена масивом	

У зоні III для розрахунку зрушень та деформацій у кожному конкретному перерізі, що проходить через відповідну точку на прямій X_1X_2 , приймається напівмольда $L_{3(i)}$, яка визначається з урахуванням глибини в цій точці. Якщо кут падіння пласта в межах очисної виробки не змінюється, L_{3i} можна визначити графічно (рис. 2).

Нижче наведено результати порівняння розрахунків зрушень та деформацій земної поверхні, виконані за нормативною методикою [1] та з урахуванням викладених пропозицій щодо її уточнення. Розрахунки виконані для наступних гірничо-геологічних умов відпрацювання лави в напрямку вхрест простягання.

Розрахунок виконаний у головних перерізах за простяганням, що проходять через точки X_1 і X_2 (рис. 1). Результати розрахунку зведені в табл. 1.

Для кількісної оцінки обчислені абсолютні та відносні відхилення зрушень і деформацій земної поверхні за відповідними точками досліджуваних ліній (перетинів) (табл. 2).

Результати досліджень натурних маркшейдерських інструментальних вимірювань. Розглянемо питання зміни параметрів зрушення

земної поверхні під час повторної підробки. Аналіз результатів вивчення зрушення земної поверхні на вугільних родовищах показує, що параметри її зрушення при повторній підробці відрізняються від таких при первинній підробці. Такий же висновок можна зробити й із загальних закономірностей формування зони впливу гірничих розробок на земну поверхню [5–7]. Залежності кутових параметрів від показників міцності гірських порід описують формулами:

$$\delta_0 = 90^\circ - \arctg \sqrt{\frac{\mu}{1-\mu}};$$

$$\beta_0 = (90^\circ - \alpha) - \left(\cos^2 \alpha - \frac{\mu}{1-\mu} \sin^2 \alpha \right) (90^\circ - \delta_0);$$

$$\operatorname{ctg} \delta_0 = a k_0 H \gamma \sigma_0^{-1},$$

де β_0 , δ_0 – кутові параметри: μ – коефіцієнт Пуассона для гірських порід; σ_0 – міцність порід на одноосовий стиск; a , k_0 – коефіцієнти пропорційності.

Очевидно, що в наведених виразах показники міцнісних властивостей порід виступають у ролі узагальнювальних показників властивостей підроблюваного породного масиву. Якщо

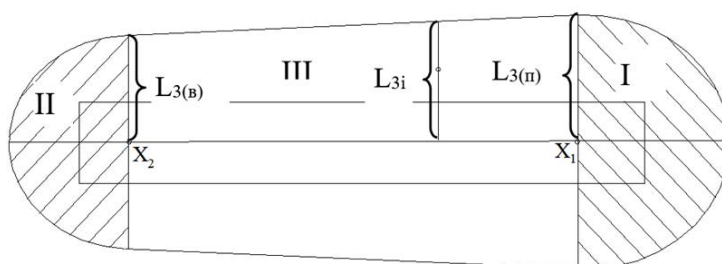


Рис. 2. Зони розрахунку зрушень та деформацій при відпрацюванні вугільного пласта довгими стовпами вхрест простягання

Таблиця 1

Параметр	За методикою «Правил підробки...» [1]		За новою методикою	
	Повстання	Падіння	Повстання	Падіння
H , м	246	356	246	356
L_3 , м	209	209	189	229
N_2	0,866	0,866	0,947	0,8
η_m , мм	512	512	560	473

Таблиця 2

Відхилення обчислених параметрів зрушення

Найменування параметра	Відхилення, %	
	Повстання	Падіння
Осідання	9	7
Нахил	28	20
Горизонтальна деформація	49	37
Кривизна	60	41
Горизонтальне зрушення	17	13

розглядати вже прироблений масив, то міцнісні властивості гірських порід «у куску» залишаються такими ж, як і до підробки, але масив загалом перетерпить істотні зміни і, з огляду на наведені вирази, варто очікувати зміни кутових параметрів зрушення земної поверхні.

До такого ж висновку приводить аналіз залежностей, що характеризують загальні закономірності формування мульди зрушення:

$$\eta_{(x)} = -\frac{\eta_0}{2} \left[\Phi \left(\frac{D_p + x}{C_p H} \right) + \Phi \left(\frac{D_p - x}{C_p H} \right) \right];$$

$$\eta = \frac{k}{\pi c^2 z^2} \exp \left[-\frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{c^2 z^2} \right],$$

де C_p і c – коефіцієнти, що залежать від фізико-механічних властивостей підроблюваної товщі.

Фізико-механічні властивості підробленого й непідробленого породного масиву різні, тому й коефіцієнти C_p і c , що їх характеризують, повинні відрізнятися. А це неминуче приведе до зміни закону розподілу зрушень і деформацій у мульді зрушення.

Цілеспрямовані натурні дослідження параметрів зрушення в умовах породного масиву, що порушений гірничими роботами, виконувалися на багатьох родовищах і, зокрема, на шахтах Донецького та Львівсько-Волинського басейнів. В узагальненому вигляді результати цих досліджень віддзеркалені в «Правилах підробки...» [1] і стосовно до основних показників зрушення земної поверхні зводяться до такого.

Розподіл зрушень і деформацій земної поверхні в мульді зрушення. У нормативному документі [1] вказується на зміну характеру розподілу й величин зрушень і деформацій земної поверхні та товщі при повторних підробках у зв'язку з активізацією процесу зрушення порівняно зі зрушеннями й деформаціями від одиночної виробки при первинній підробці. Загалом же, зміна характеру розподілу зрушень і деформацій поверхні при повторній підробці не відзначається.

Кутові параметри зрушення земної поверхні. Правила [1] регламентують зміну граничного кута β_0 , що визначає границю впливу гірничих робіт на земну поверхню з боку падіння, при її повторній підробці. Ці зміни виражаються в зменшенні величин граничних кутів на 5° і стосуються районів Донбасу (за винятком Західного Донбасу) з марками вугілля: Д, ДГ, Г, ГЖ, ГЖО, Ж, ДО, КЖ, КС, ОС, Т, ТС. У районах залягання вугілля марки А при повторній підробці всі граничні кути (β_0 , δ_0 , γ_0) у корінних породах приймаються крутіше на 5° .

Зміни кутів зрушення β , δ , γ при повторній підробці відзначені в антрацитових районах

Донбасу й у Львівсько-Волинському басейні, причому в останньому на 5° зменшується кут зрушення й у мезозойських відкладеннях δ_m .

Відносна величина максимального осідання q_0 при повторній підробці земної поверхні для умов Львівсько-Волинського басейну регламентується на 10 % більше, ніж при первинній підробці. При повторній підробці й кутах падіння від 0° до 25° у Донбасі відносна величина максимального осідання q'_0 обчислюється за формулою:

$$q'_{0n} = q_0 \left[1 + (1 - q_0) \frac{H_1}{H} \right]$$

де q_0 – відносна величина максимального осідання при первинній підробці.

На інших вугільних родовищах України зміна відносної величини максимального осідання при повторних підробках не відзначена.

Аналіз даних, наведених у Правилах [1], указує на неоднозначне висвітлення залежності параметрів зрушення земної поверхні від умов її підробки. Очевидно, що в наведених даних відсутній загальний логічний зв'язок. Це виражається в тім, що ті самі параметри на різних родовищах по-різному змінюються при повторній підробці. На наш погляд, причина полягає не стільки в геологічних і геомеханічних розходженнях родовищ, скільки у відсутності відповідної інформації про закономірності зрушення земної поверхні в умовах повторної підробки [8–10]. А це, своєю чергою, є наслідком відсутності системних досліджень на родовищах, для яких у даний час не встановлені параметри зрушення в умовах породного масиву, що порушений гірничими роботами.

Як приклад розглянемо результати натурних спостережень за зрушенням земної поверхні в Західному Донбасі на шахті «Степова», де спостережна станція № 7 була підроблена лавами № 721, № 723 пласту c'_6 і лавами № 621, № 623 пласту c_6 . Глибина гірничих робіт під спостережною станцією по пласту c'_6 становить 190 м, а по пласту c_6 – 202 м. Границі гірничих робіт в обох пластах (623-й і 723-й бортові штреки) у плані збігаються і знаходяться під 27-м репером профільної лінії № 1 (рис. 3). Розрив у часі між підробками становить 2,5 року.

На рис. 4 наведені графіки осідань, нахилів і горизонтальних деформацій земної поверхні, отримані за спостереженнями переміщень реперів спостережної станції № 7 на моменти закінчення процесу зрушення після первинної підробки гірничими роботами по пласту c'_6 і після повторної підробки пластом c_6 . Аналіз графіків показує, що величини зрушень і деформацій

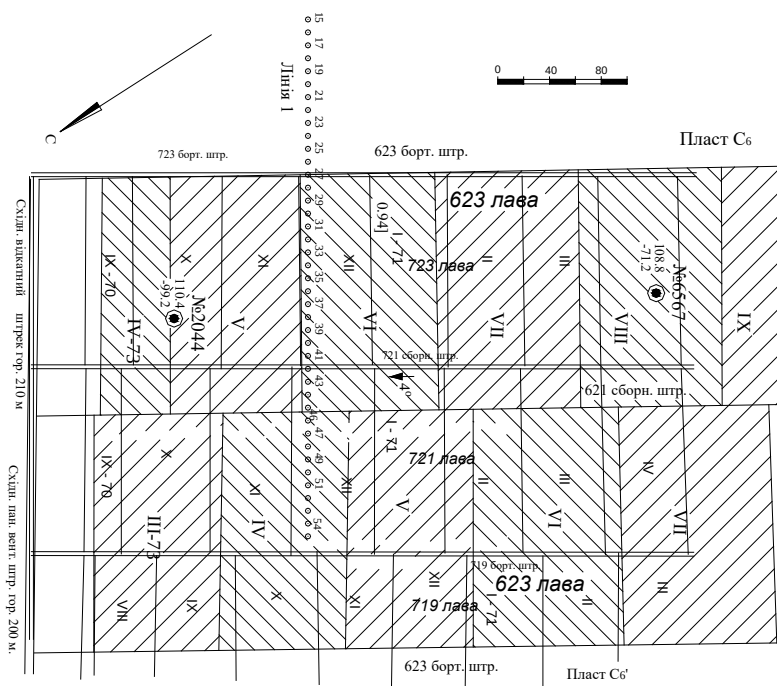


Рис. 3. Суміщений план гірничих робіт і спостережної станції № 7

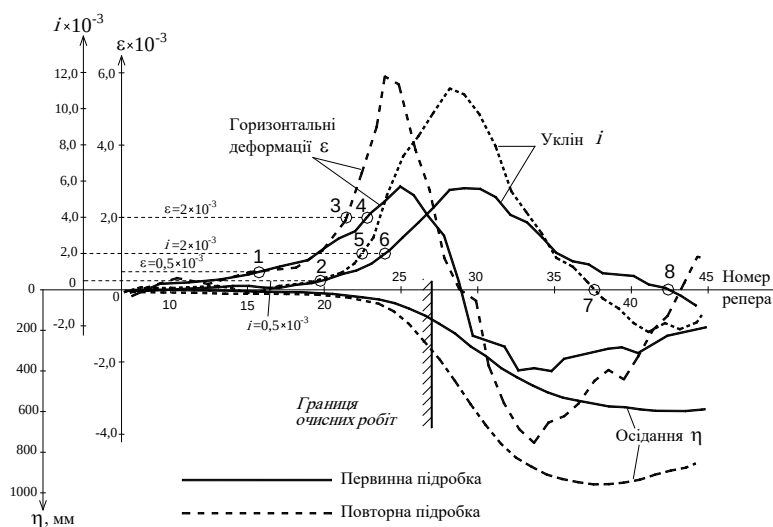


Рис. 4. Графіки зрушень і деформацій земної поверхні по профільній лінії спостережної станції № 7 після первинної і повторної підробок

земної поверхні після первинної та повторної підробок значно відрізняються. За майже однакової потужності пластів (для c'_6 $m = 0,90$ м, для c_6 $m = 0,94$ м) осідання при повторній підробці на 50 % більше, нахили й розтягання поверхні – удвічі більше, ніж при первинній підробці.

Границі впливу очисних робіт від обох пластів на земній поверхні збігаються. Це спостерігається як за критерієм розтягання земної поверхні $\varepsilon = 0,5 \cdot 10^{-3}$ (точка 1 на рис. 2), так і за критерієм нахилу $i = 0,5 \cdot 10^{-3}$ (т. 2), але при

цьому точки 1 і 2 розташовані на відстані 40 м одне від одного. Границі небезпечного впливу за критеріями $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ (точки 3 і 4) і $i = 2 \cdot 10^{-3}$ (точки 5 і 6), рознесені уздовж профільної лінії, що свідчить про відмінність кутів зрушення δ при первинній і повторній підробках.

Важливою особливістю, що не знайшла відображення в [1], є факт розбіжності точок початку плоского дна при первинній і повторній підробках (точки 7 і 8). Положення цих точок визначає значення кутів повних зрушень ψ і свідчить про

те, що при повторній підробці кут повних зрушень крутіше, ніж при первинній підробці.

Висновки. У разі відпрацювання пластів довгими стовпами хрест простягання:

1. Мульда зрушення у плані приймає «грушоподібну», а не еліптичну форму, через невідповідності напівмульд у головних перерізах за простяганням у зонах падіння і повстання пласта.

2. Відмінність коефіцієнтів, що характеризують підробленість земної поверхні N_2 у основних перетинах по простяганням на ділянці «плоського дна» призводить до поступового зростання максимального осідання в бік повстання пласта.

3. Істотна відмінність коефіцієнтів N_2 у зонах з боку падіння та повстання пласта (зони I та II) призводить до зміни характеру розподілу зрушень та деформацій у межах напівмульд.

4. Порівняльний аналіз показав, що значення зрушень та деформацій, обчислених за чинною методикою [1], дає дещо завищені величини з боку падіння пласта та занижені – з боку повстання.

Встановлені відмінності параметрів зрушення земної поверхні при первинній і повторній підробках властиві умовам підробки спостережної станції № 7. Але вони дають змогу зробити висновок, що подібні відмінності мають місце і вони на стільки істотні, що докорінно змінюють представлення про закономірності зрушення земної поверхні при веденні очисних робіт в умовах порушеного гірничими роботами породного масиву. Це, своєю чергою, указує на необхідність проведення системних досліджень процесу зрушення земної поверхні в Західному Донбасі з метою встановлення параметрів зрушення при повторній і наступних підробках.

ЛІТЕРАТУРА:

1. ДСТУ 101.00159226.001-2003 Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. *Галузевий стандарт*. Київ : Мінпаливенерго України, 2004. 127 с.
2. Kuchin O. S., Chemakina M. V., Balafin I. E. Displacement of undermining rock mass above the moving longwall *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2017. № 1. P. 55–60.
3. Bazaluk O., Kuchyn O., Saik P., Soltabayeva S., Brui H., Lozynskyi V., Cherniaiev O. Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline. *Scientific Reports*. 2023. № 13. 19327. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46814-5>
4. Kuchin O., Brui H., Yankin O., Ishutina H. The relationship between lowering the Earth's surface and bearing pressure above the advancing longwall face. *JGD*. 2023. Vol. 1(34). P. 28–36. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.028>
5. Nazarenko V., Brui H., Kuchin O., Balafin I. Investigation of reused preparatory workings deformations of as a result of cleaning operations. *Mongolian Geoscientist*. 2025. № 30(60). P. 1–9. <https://doi.org/10.5564/mgs.v30i60.3592>
6. Sakhno I., Sakhno S., Vovna O. Surface Subsidence Response to Safety Pillar Width Between Reactor Cavities in the Underground *Gasification of Thin Coal Seams. Sustainability*. 2025. № 17(6). 2533. <https://doi.org/10.3390/su17062533>
7. 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. № 1254, 012057. <https://doi.org/10.3390/app14135733>
8. Bubnova O. Regularities of subsidence development during multiple underworking of the earth's surface in the Lviv-Volyn coal basin conditions *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2024. № 1348. 012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012065>
9. Zberovskiy V., Bubnova O., Babii K. Specifics of hydro-loosening of coal seams with account of rocks displacement parameters *Ukrainian School of Mining Engineering*. 2018. № 60 (00025). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000025>
10. Chetveryk M., Bubnova O., Babiy K. The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface *Mining of Mineral Deposits*. 2017. № 11(1). P. 57–64. <https://doi.org/10.15407/mining11.01.057>

REFERENCES:

1. SSTU 101.00159226.001-2003. Pravyla pidrobky budivel, sporud i pryrodnykh ob'ektiv pry vydobuvanni vuhillia pidzemnym sposobom [Rules for tampering with buildings, structures and natural objects during underground coal mining]. *Industry standard Ministry of Energy of Ukraine*, 2004, 127 p. [in Ukrainian].
2. Kuchin, O. S., Chemakina, M. V., & Balafin, I. E. (2017). Displacement of undermining rock mass above the moving longwall. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 55–60.

3. Bazaluk, O., Kuchyn, O., Saik, P., Soltabayeva, S., Brui, H., Lozynskyi, V., & Cherniaiev, O. (2023). Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline. *Scientific Reports*, (13), 19327. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46814-5>
4. Kuchin, O., Brui, H., Yankin, O., & Ishutina, H. (2023). The relationship between lowering the Earth's surface and bearing pressure above the advancing longwall face. *JGD*, 1(34), 28–36. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.028>
5. Nazarenko, V., Brui, H., Kuchin, O., & Balafin, I. (2025). Investigation of reused preparatory workings deformations of as a result of cleaning operations. *Mongolian Geoscientist*, 30(60), 1–9. <https://doi.org/10.5564/mgs.v30i60.3592>
6. Sakhno, I., Sakhno, S., & Vovna, O. (2025). Surface Subsidence Response to Safety Pillar Width Between Reactor Cavities in the Underground. *Gasification of Thin Coal Seams. Sustainability*, 17(6), 2533. <https://doi.org/10.3390/su17062533>
7. 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>
8. Bubnova, O. (2024) Regularities of subsidence development during multiple underworking of the earth's surface in the Lviv-Volyn coal basin conditions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1348, 012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012065>
9. Zberovskyi, V., Bubnova, O., & Babii, K. (2018). Specifics of hydro-loosening of coal seams with account of rocks displacement parameters. *Ukrainian School of Mining Engineering*, 60 (00025). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000025>
10. Chetveryk, M., Bubnova, O., & Babiy, K. (2017). The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface. *Mining of Mineral Deposits*, 11(1), 57–64. <https://doi.org/10.15407/mining11.01.057>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 29.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 622.764.6: 66.046.59

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-24>

КОМПЛЕКСНА ПЕРЕРОБКА ЗОЛОШЛАКОВИХ ВІДХОДІВ У КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ЕКОНОМІКИ

Олійник Тетяна Анатоліївна,

доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедрою збагачення корисних копалин та хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-0315-7308

Скляр Людмила Василівна,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри збагачення корисних копалин та хімії
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-2721-1436

Золошлакові відходи теплоелектростанцій є одними з найбільш масштабних техногенних утворень в Україні та становлять суттєву екологічну загрозу. Водночас вони містять цінні компоненти, які можуть бути використані як вторинна сировина. Перехід до циркулярної економіки вимагає створення ефективних технологій їх комплексної переробки. У статті розглянуто сучасні підходи до комплексної переробки золошлакових відходів теплоелектростанцій як одного з ключових інструментів впровадження принципів циркулярної економіки. Актуальність дослідження зумовлена значними обсягами накопичених золошлаків в Україні, їх негативним впливом на довкілля та недостатнім рівнем залучення цінних мінеральних компонентів у господарський обіг. Золошлакові відходи Зеленодольської ТЕС розглядаються як складна багатоконпонентна техногенна система, придатна для одержання вторинного палива, залізовмісних й алюмосилікатних продуктів.

У межах дослідження вивчено речовинний, хімічний, гранулометричний і фазово-мінералогічний склад золошлаків, а також їх фізико-механічні властивості. Для розділення компонентів використано магнітну сепарацію в сильному магнітному полі, флотаційне збагачення з добром оптимальних реагентних режимів і гравітаційне розділення продуктів. Показано, що поєднання магнітної сепарації та флотації забезпечує ефективне вилучення залізовмісного продукту з масовою часткою Fe понад 40 %, вуглецевого концентрату з вилученням вуглецю більш як 90 %, а також алюмосилікатних мікросфер з унікальними функціональними властивостями. Отримані продукти можуть бути використані в металургії, енергетиці та виробництві будівельних матеріалів. Орієнтовна економічна оцінка засвідчила високу інвестиційну привабливість запропонованої технології та строк її окупності на рівні 2–3 років.

Ключові слова: золошлакові відходи, циркулярна економіка, флотація, магнітна сепарація, алюмосилікатні мікросфери, техногенна сировина.

Oliinyk Tetiana, Skliar Liudmyla. Comprehensive processing of ash and slag waste in the context of the circular economy

Ash and slag wastes from thermal power plants are among the largest technogenic formations in Ukraine and pose a significant environmental threat. At the same time, they contain valuable components that can be used as secondary raw materials. The transition to a circular economy requires the development of efficient technologies for their integrated processing. This paper examines contemporary approaches to the comprehensive processing of ash and slag wastes from thermal power plants as one of the key instruments for implementing the principles of a circular economy. The relevance of the study is determined by the substantial volumes of accumulated ash and slag in Ukraine, their adverse environmental impact, and the insufficient involvement of valuable mineral components in economic circulation. Ash and slag wastes from the Zelenodolsk Thermal Power Plant are considered as a complex, multicomponent technogenic system suitable for the production of secondary fuel, iron-bearing and aluminosilicate products.

Within the framework of the research, the material, chemical, particle-size and phase–mineralogical composition of the ash and slag, as well as their physico-mechanical properties, were investigated. Magnetic separation in a high-intensity magnetic field, flotation beneficiation with the selection of optimal reagent regimes, and gravity separation of products were employed to separate the components. It is shown that the combination of magnetic separation and flotation ensures the efficient recovery of an iron-bearing product with an Fe content exceeding 40%, a carbon concentrate with carbon recovery above 90%, and aluminosilicate microspheres possessing unique functional properties. The obtained products can be used in metallurgy, the energy sector and the production of building materials. A preliminary economic assessment has demonstrated the high investment attractiveness of the proposed technology and a payback period of approximately 2–3 years.

Key words: ash and slag waste, circular economy, flotation, magnetic separation, aluminosilicate microspheres, man-made raw materials.

Вступ. Золошлакові відходи теплоелектростанцій становлять одну з найбільш масштабних техногенних мас у структурі промислових відходів України. Їх накопичення призводить до деградації земель, забруднення підземних і поверхневих вод, утворення пилових викидів та збільшення антропогенного навантаження на довкілля. В умовах обмеженості природних ресурсів та посилення вимог екологічної безпеки особливої актуальності набувають підходи, що передбачають повторне залучення таких відходів у виробничі процеси. Теплоелектростанції формують значний потенціал вторинної сировини, який залишається недостатньо використаним через відсутність системного аналізу властивостей золошлакових матеріалів та ефективних технологій їх переробки.

Запровадження принципів циркуляційної економіки передбачає перехід від лінійної моделі «видобуток – спалювання – захоронення» до замкнених матеріальних циклів. Тому дослідження можливостей раціонального використання золошлакових відходів є актуальним напрямом, що відповідає сучасним світовим тенденціям сталого розвитку, зменшує навантаження на природні ресурси та сприяє екологічній модернізації енергетичної галузі.

Переробка твердого палива пов'язана зі значним виходом мінеральних відходів. На сьогоднішній день у відвалах теплоелектростанцій України акумульовано 358,8 млн т золошлаків на площі 3170 га. Середньорічний вихід відходів досягає 14 млн т та з огляду на погіршення якості палива має тенденцію до зростання. Відвали займають значні земельні площі і є джерелами несприятливої екологічної обстановки в регіонах. Щорічно збільшується вартість транспортування золи та шлаків ТЕС у відвали, вартість будівництва золовідвалів та їх реконструкції. Тривалий час уважалося, що мінеральні компоненти твердого палива є баластом під час його переробки, тому відходи прямували у відвали, що спричиняло зростання обсягів золостволів, спорудження яких пов'язане з відчуженням орної землі, потребує великих капітальних витрат і порушує екологічний природний баланс. Мінеральна частина золи містить переважно оксиди кремнію, алюмінію, заліза, кальцію та магнію, а також низку мікро- та рідкісних елементів. Хімічний склад золи може коливатися при спалюванні одного і того ж палива на ТЕС, проте в середньому хімічний склад протягом тривалого періоду можна вважати досить стабільним для практичного застосування.

З огляду на відносну стабільність хімічного складу та фізико-механічних властивостей,

золошлакові відходи можуть розглядатися як складна техногенна сировина, що придатна для комплексної переробки.

Проаналізувавши сучасну наукову літературу щодо переробки золошлакових відходів (далі – ЗШВ) в контексті циркулярної економіки, дійшли висновку, що всі дослідження можна умовно поділити на чотири ключові кластери.

1. Концептуальні засади та оглядові роботи. У цьому блоці варто посилатися на роботи, які обґрунтовують необхідність переходу від лінійної моделі («видобув – спалив – викинув») до циркулярної. Фундаментальний огляд авторів, який класифікує всі можливі шляхи використання золи, наголошує, що лише комплексний підхід відповідає принципам сталого розвитку [1]. Автори статті доводять, що фокус змістився з простого захоронення на використання золи як ресурсу [2]. Комплексний погляд на інтеграцію електростанцій та переробних заводів у єдиний еокластер показано в статті [3].

2. Виробництво «зелених» будівельних матеріалів та геополімерів – це найбільш досліджена сфера. Основна мета виробництва – заміна портландцементу для зниження вуглецевого сліду. Дослідники з Китаю та Австралії (наприклад, роботи в журналах *Construction and Building Materials*, *Journal of Cleaner Production*) активно вивчають використання летючої золи як прекурсора для геополімерного бетону. Основний фокус останніх 5 років – підвищення довговічності та стійкості таких матеріалів до агресивних середовищ. Так, автори доводять, що геополімерний бетон (безцементний) є більш стійким до хімічної агресії, ніж звичайний бетон, що розширює сферу його застосування [4]. Технології створення дорогих матеріалів (скло-кераміки, піноскла) із відходів, що підвищує економічну привабливість переробки описано в роботі [5]. Дослідження в Європі та Сингапурі розглядають суміші на основі золи для будівельних 3D-принтерів, що дає змогу досягти безвідходного виробництва. Використання золи в сумішах для будівельних 3D-принтерів розглянуто авторами в роботі [6].

3. Вилучення критичних та рідкісноземельних металів. Огляд технологій вилучення (кислотне вилугування, біометоди) підкреслює стратегічну важливість золи як техногенного родовища. Рідкісноземельні елементи критично важливі для електроніки та «зеленої» енергетики. Дослідження в США та Канаді зосереджені на методах кислотного вилугування й біовилугування (використання бактерій) для екстракції скандію, ітрію та лантанодів із золи [7]. Європейське дослідження (Польща)

оцінює потенціал золи як джерела лантанодів для промисловості ЄС [8].

4. Екологічне застосування та сільське господарство – дослідження в цьому напрямі фокусуються на ремедіації (відновленні) навколишнього середовища. Доведено кількісне зниження навантаження на довкілля при використанні золи в дорожньому будівництві [9] та порівнюється «вуглецевий слід» традиційного бетону та бетону на основі золи [10].

Про синтез високоефективних сорбентів (цеолітів) із відходів енергетики розповідають автори статті [11; 12].

Отже, аналіз попередніх досліджень зазначив, що попри значний прогрес у технологіях рециклінгу (геополімери, вилучення металів), більшість досліджень фокусуються на лабораторних експериментах. Є прогалина в дослідженнях щодо промислового масштабування цих технологій та створення замкнутих логістичних ланцюгів в умовах економік, що розвиваються.

Мета дослідження – дослідити сучасні підходи та практичні рішення щодо переробки золошлакових відходів Зеленодольської ТЕС для формування елементів циркуляційної економіки та мінімізації обсягів промислових відходів.

Завдання дослідження: вивчити речовинний та фазово-мінералогічний склад золошлакових відходів; оцінити ефективність магнітного, флотаційного та гравітаційного збагачення; розробити комплексну безвідходну технологію переробки твердих золошлакових відходів.

Методи та методики дослідження. Вивчаючи речовинний склад золошлакового матеріалу, використовували методи гравітаційного, гранулометричного, хімічного, спектрального, оптичного, термічного аналізів. Хімічний аналіз виконували за ДСТУ 10538.0-72, що передбачає визначення десяти головних компонентів: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , $\text{Fe}_{\text{заг.}}$, Fe_2O_3 , SO_3 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 . Для фазово-мінералогічного аналізу необхідне попереднє концентрування мінералогічних фаз в окремих фракціях, що забезпечує більш повну діагностику складу мінералу.

Магнітну сепарацію здійснювали в сильному полі з метою вилучення залізовмісних компонентів на роликовому магнітному сепараторі 138Т-СЭМ при напруженості магнітного поля 0,5, 1,6 та 2 Тл.

Флотаційне збагачення проводили з метою отримання вуглевмісткого концентрату. На першому етапі флотаційних досліджень визначалися витрати реагентів та тривалості контактування суспензії зі збирачем, депресором і піноутворювачем. Дослідження проводили у флотомашині 240Фл-А з об'ємом камер 2; 1,5

та 1 л. Добір оптимального режиму флотації здійснювався у відкритому циклі.

Результати. У результаті вивчення золошлакових відходів установлено, що золошлакові відходи Зеленодольської ТЕС є багатокомпонентною гетерогенною системою, яка сформована в умовах високотемпературного спалювання вугілля та швидкого охолодження продуктів згоряння. Макроскопічно матеріал представлено рихлою масою з включеннями оплавлених та частково спечених шлакових агрегатів різної морфології (зерна мають різний розмір, шлак оплавлений, є частково спікливі пористі куски). Мікроскопічні дослідження підтвердили наявність значної кількості склоподібних фаз, що перебувають у тісному зрощенні з мінералами заліза та залишками незгорілого вуглецю. На рис. 1 візуалізовано мікроструктуру вихідної сировини (вугілля) та твердих продуктів згоряння (золошлакових відходів).

Кругла форма шлаку свідчить про те, що при спалюванні вугілля утворюється плав, який, потрапляючи у воду, призводить до утворення сферичних гранул. У топкових процесах відбувається низка перетворень, які не встигають завершитися до настання рівноважного стану. Продуктом такої незавершеної рівноваги є склоподібна фаза. Загальний вигляд різних фаз золошлакових відходів наведено на рис. 2.

Різноманітність склоподібних фаз зводиться до чотирьох видів, які відрізняються кольором та показником заломлення: А – безбарвна, В – жовта, Г – бура, Д – чорна. У цих продуктах міститься зазвичай та або інша кількість частинок незгорілого палива від одиничних продуктів до 30–40 %. При задовільному перебігу процесу та високої реакційної особливості палива їх кількість невелика. Незгоріле паливо відрізняється від вихідного й міститься у вигляді коксу та напівкоксу з малою гігроскопічністю. Перераховані фазово-мінералогічні складники є основними для золи палив.

Хімічний склад проб золошлакових відходів Зеленодольської ТЕС наведено в таблиці 1.

Результати гранулометричного аналізу золошлаків наведено в таблиці 2.

Гранулометричний аналіз (див. Табл. 2) показав, що всі класи крупності містять однакові фазово-мінералогічні компоненти, однак їх співвідношення суттєво змінюється зі зменшенням розміру частинок. У дрібних фракціях зростає вміст склоподібної фази та незгорілого вуглецю, тоді як у крупних переважають шлакові агрегати з включеннями залізистих мінералів. Така особливість зумовлює необхідність поетапного комбінованого збагачення.

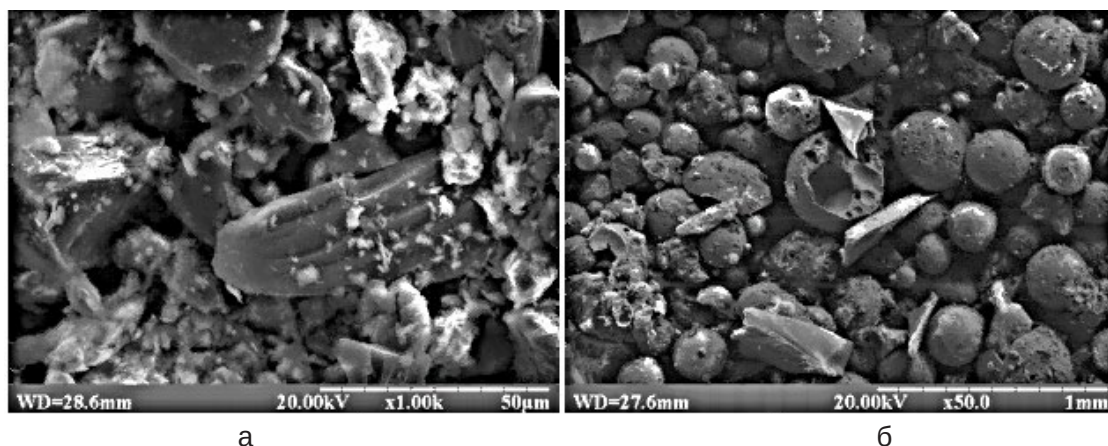


Рис. 1. Мікроструктура золошлаків: а – загальний вигляд вугілля, б – золошлак

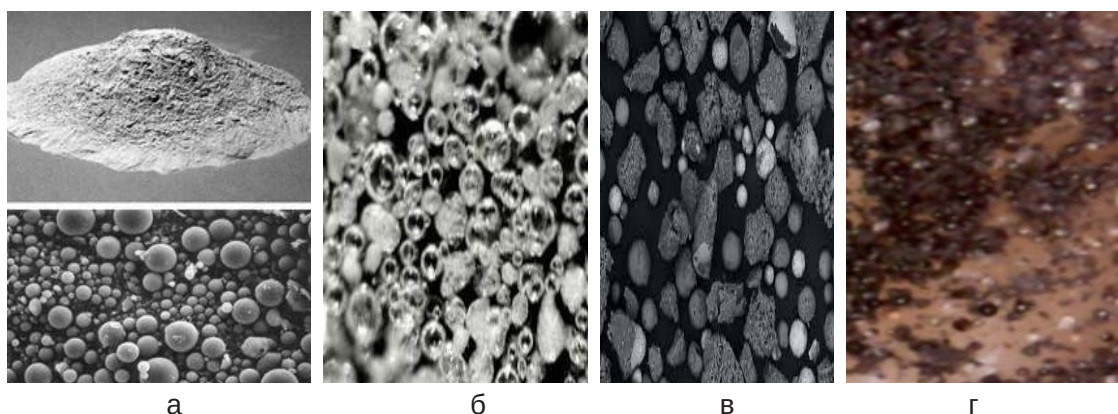


Рис. 2. Загальний вигляд різних фаз золошлакових відходів
а – склоподібна фаза; б – алюмосилікатні мікросфери; в – вугільні частинки;
г – залізовмісні частинки

Таблиця 1

Хімічний склад проб золошлакових відходів Зеленодольської ТЕС

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ +FeO	MnO	MgO	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	п.п.п.
8,3	51,2	18,0	14,4	0,07	1,3	1,6	0,082	0,12	3,0	0,9	0,82	7,5

Таблиця 2

Результати гранулометричного аналізу золошлаків, %

Клас крупності, мм	Вихід, %	Фазово-мінералогічний склад, %								
		мінерали заліза	фосфати, карбонати та ін.	кульки			скло	округлі гранули	кварц тридиміт	вугілля
				чорні	безколь- рові	білі матові				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
+1,0	0,4	50	–	45	5	–	–	–	–	–
–1,0– +0,5	3,3	20	2	65	17	–	79	–	16	–
–0,5 + 0,25	20,4	–	10	33	24	10	79	–	43	1
–0,25 + 0,16	26,4	–	18	80	22	5	10	7	13	45
–0,16 + 0,07	24,1	–	27	75	50	8	5	10	12	13
–0,07 + 0,04	25,4	–	2	17	28	8	–	20	–	25
Загалом	100	0,4	3,3	14,1	21,0	5,4	18,4	9,2	6,8	21,4

Згідно з показниками заломлення, склоподібна фаза містить скло польовошпатового, кварцового й залізного складів, залізного кордієриту.

Вказане скло має близькі фізико-механічні властивості: густина – 2550–2650 кг/м³, твердість – 5–7,5, питома магнітна сприйнятливості (діаманітон) – (0,46–0,92)·10⁻⁶ см³/г.

У результаті вивчення речовинного складу золошлакового матеріалу встановлено, що розділення шлаків на мономінеральні фракції досягти неможливо. Це пояснюється специфікою золошлакового матеріалу, хімічною неоднорідністю компонентів, взаємним плавленням, наявністю пухирців газу в кульках склоподібної фази, вкрапленістю магнетиту та вугілля.

Магнітна сепарація в сильному полі дала змогу ефективно виділити залізовмісний концентрат з масовою часткою Fe понад 40 %, що відповідає вимогам до вторинної сировини для агломераційного виробництва. Так, при індукції магнітного поля 2 Тл масова частка заліза в немагнітному продукті склала 3,6 %, а в магнітному продукті – 35–42 %. Немагнітний продукт, збагачений алюмосилікатними компонентами та вуглецем, був спрямований на флотаційну доводку для отримання алюмовмісного продукту й вугільного концентрату.

Як відомо, золи теплових електростанцій, що спалюють мало реакційне вугілля, найефективніше збагачуються флотацією [13]. При цьому застосовують такі реагенти, як аполярні

та гетерополярні поверхнево-активні речовини: керосин, газойль, ААР, скипидар, Т-66 та інші вищі спирти, що сприяють переходу вуглецю до 70–80 % у пінний продукт. Тому надалі досліджено процес флотації немагнітного продукту з розробкою реагентного режиму.

Вивчали вплив відомих реагентів для флотації вугілля, легких і важких продуктів нафтопереробки, а також їх сумішей на ефективність флотації золи. Зокрема, досліджували вплив дизельного палива, дизельного й турбінного масел, суміші цих масел з керосином та іншими аполярними розчинниками. Результати досліджень представлені в табл. 3.

Аналіз даних показує, що високов'язкі продукти (дизельне масло) мають слабкі властивості збирача ($\epsilon = 23,7$ %), мало- та середньов'язкі (керосин, дизельне паливо) дають змогу вилучити в концентрат до 65 % вуглевмісткої золи. Найбільш ефективно процес збагачення золи протікає при використанні комбінованих реагентів, які становлять суміш в'язких та малов'язких продуктів нафтопереробки ($\epsilon > 70$ %), особливо при використанні реагенту МК ($\epsilon > 90$ %). При флотаційному збагаченні отримано пінний та камерний продукти.

Камерний продукт флотації представлено на 60,8 % алюмосилікатними мікросферами з поверхнею, частково забрудненою вкрапленістю магнетиту, гематиту, гідроксидів заліза і вугілля.

Найвищі показники вилучення вуглецю (понад 90 %) досягнуті при використанні комбінованих

Таблиця 3

Результати флотації немагнітного продукту золошлакових відходів

Збирач	Продукт флотації	Показник збагачення, %		
		вихід	зольність	вилучення
Дизельне паливо	концентрат	26,8	40,3	54,3
	відходи	73,2	81,7	
	вихідний	100	70,6	
Дизельна олія	концентрат	15,1	53,7	23,7
	відходи	84,9	73,6	
	вихідний	100	70,6	
Суміш дизельної олії з керосином	концентрат	38,9	41,0	77,6
	відходи	61,1	89,1	
	вихідний	100	70,4	
Суміш турбінної олії з керосином	концентрат	33,6	41,9	72,6
	відходи	70,4	86,7	
	вихідний	100	73,4	
Реагент МК	концентрат	40,7	38,3	91,7
	відходи	59,3	96,2	
	вихідний	100	72,6	
Керосин	концентрат	32,4	43,7	64,7
	відходи	67,6	85,3	
	вихідний	100	71,8	

реагентів на основі продуктів нафтопереробки, що поєднують властивості малов'язких та в'язких збирачів. Отриманий вугільний концентрат із зольністю 10–15 % може бути повторно використаний у паливному циклі ТЕС, що зменшує потребу в первинному паливі.

Камерний продукт флотації містить значну кількість алюмосилікатних мікросфер, які після додаткового гравітаційного розділення поділяються за густиною.

З метою повнішого вилучення мікросфер щільністю менш ніж 1000 кг/м^3 було проведено очищення їх поверхні.

У результаті перемішування хвостів флотації в щільній суспензії (70 % твердого) поверхня мікросфер очистилася, а також частково руйнувалися агрегати, що налічують мікросфери, зцементовані глинистою речовиною і зростками вугілля з мікросферами. У результаті збільшилася кількість мікросфер та вільних вугільних зерен. При зануренні у воду очищеного продукту виділено 2,5 % легкої фракції (1,2 % від вихідного). Мінералогічним аналізом під мікроскопом встановлено, що ця фракція містить 71 % алюмосилікатних мікросфер. Решта частини представлена вугільними зернами округлими або овальними вуглисто-силікатними та гранулами з уламками мікросфер. Мікросфери порожнисті й частково заповнені, товщина оболонки переважно нерівномірна, поверхня гладка або ніздрювата. Частина порожнистих мікросфер має тонку, крихку оболонку. Рідко трапляються мікросфери з товщиною оболонки 10 % від діаметра.

Показники, хімічний склад і фізичні властивості продуктів розділення наведено в табл. 4.

При згоранні тонкоподрібнених частинок вугілля домішки оксиду алюмінію, кремнію та

інших елементів, наявних у природному вугіллі, за високої температури утворюють складні силікати, що приймають у розплавленому стані сферичну форму. Завдяки розчиненням у силікатах газам відбувається роздування сферичних мікрокрапель розплавлених.

Характеристики алюмосилікатних мікросфер наведено в табл. 5.

Сукупність унікальних властивостей мікросфер: низька густина, малі розміри, сферична форма, висока твердість і температура плавлення, хімічна інертність – зумовлюють щонайширший спектр застосувань мікросфер у сучасній промисловості.

Отримані алюмосилікатні продукти можуть бути використані як функціональні наповнювачі у виробництві легких бетонів, сухих будівельних сумішей, тампонажних розчинів та теплоізоляційних матеріалів. Абразивний продукт, сформований переважно зі склоподібних уламків, характеризується високою твердістю та може застосовуватися для струменевої обробки поверхонь або в дорожньому будівництві.

У результаті виконаних пошукових досліджень з магнітного збагачення й флотації та їх синтезу розроблена й перевірена в лабораторних умовах комплексна технологія збагачення з отриманням залізо-, вугле-, алюмовмісних продуктів (Рис. 3). У результаті дослідження технології збагачення відходів напрацьовані продукти збагачення для споживчої оцінки.

Хімічний склад і фізичні властивості продуктів збагачення золошлакових відходів наведено в табл. 6.

Запропонована комплексна технологія переробки золошлакових відходів має не лише екологічне, а й суттєве економічне значення. Зменшення обсягів відвалів дає змогу скоротити

Таблиця 4

Результати гравітаційного розділення камерного продукту флотації у водному середовищі

Найменування продукту	Вихід, %	Масова частка, %				Істина густина, кг/м^3	Насипна густина, кг/м^3
		$\text{Fe}_{\text{зар}}$	$\text{C}_{\text{орг}}$	Al_2O_3	SiO_2		
Алюмосилікатні $<1000 \text{ кг/м}^3$	2,5	4,6	5,2	22,4	64,2	830	750
Алюмосилікатні $>1000 \text{ кг/м}^3$	97,5	5,0	3,15	20,96	59,8	2150	1080

Таблиця 5

Характеристики алюмосилікатних мікросфер

Фізичні							
Розмір, мкм	Істина густина, г/см ³	Насипна густина, г/см ³	Питома вага, Н/ м ³	Твердість за Моосом	Температура плавлення, °С	Поверхнева вологість, %	
5–500	0,6–0,8	0,35–0,45	0,45–0,75	5–6	1300	0,3 max	
Хімічні, %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
55–65	20–28	1–6	0,2–0,6	1–2	0,2–4	0,3–2	0,5–1

витрати на транспортування, будівництво та експлуатацію золівдвалів, а також вивільнити значні земельні площі для альтернативного використання.

Отримані товарні продукти можуть бути реалізовані на внутрішньому ринку як вторинна сировина, формуючи додаткові джерела доходу для енергетичних підприємств.

З екологічного боку технологія сприяє зниженню пилових викидів, мінімізації ризиків забруднення ґрунтів і вод та скороченню вуглецевого сліду завдяки повторному використанню вуглецевмісного концентрату. Це створює

передумови для інтеграції теплоелектростанцій у регіональні індустриальні екокластери.

Порівняльну характеристику традиційного захоронення та циркулярної переробки золошлакових відходів наведено в табл. 7.

Орієнтовний строк окупності проєкту за наведеними умовними розрахунками (табл. 8) становить 2–3 роки, що свідчить про високу інвестиційну привабливість циркулярної переробки золошлакових відходів.

Так, циркулярна переробка золошлакових відходів є значно ефективнішою альтернативою традиційному захороненню як з екологічного,

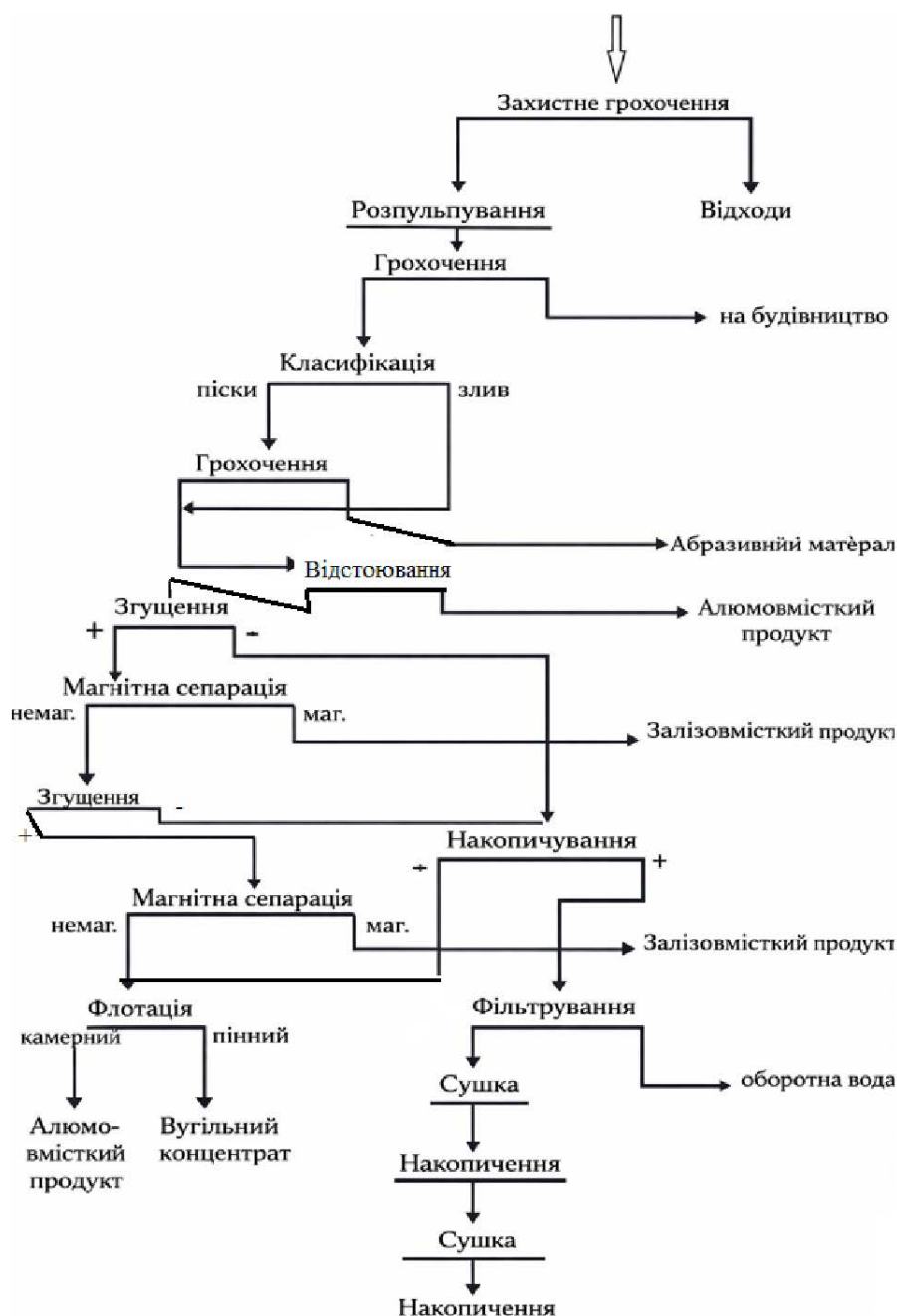


Рис. 3. Принципова технологічна схема переробки золошлакових відходів

Таблиця 6

Хімічний склад та фізичні властивості продуктів збагачення золошлакових відходів

Найменування продукту	Масова частка				Дійсна густина, кг/м ³	Насипна густина, кг/м ³	Примітки
	Fe _{заг}	C _{орг}	Al ₂ O ₃	SiO ₂			
Вугільний концентрат	1,3	85,4	1,7	5,5	1730	630	Містить 88,3 % з вугільних частинок, 8,0 % мікросфер, переважно світлих та 3,7 % зростків вугілля з мікросферами
Аюмосилікатні, густина > 1000 кг/м ³	4,6	5,2	22,4	64,2	830	750	Містить 71,0 % з різноманітних за складом і структурою мікросфер і на 29,0 % з округлих або овальних вуглисто-силікатних гранул з уламками мікросфер і частинками вугілля
Алюмосилікатні, Густина < 1000 кг/м ³	5,0	3,15	20,9	59,8	2150	1080	Містить 60,7 % мікросфер; з них 37,1 % – світлі алюмосилікатні та 23,6 % – темні і кольорові, залізисто-алюмосилікатного складу
Залізовмісний	40,6	0,9	9,6	22,5	3360	1600	Містить 60,6 % мікросфер; з них 51,7 % – темного й чорного кольору, магнетитового рідше фаялітового складу; 8,9 % – кольорові та світлі з вкрапленнями магнетиту
Залізовмісний	15,1	2,42	16,3	45,8	2620	1180	Містить більше вугільних частинок та менше мікросфер (50,5 %), велика частина яких має вкраплення магнетиту та вугілля
Абразивний	9,4	0,42	22,47	54,2	2590	1160	Містить 90,6 % склоподібних алюмосилікатних уламків, переважно залізистих, твердість за Моосом – 8,0

Таблиця 7

Порівняльна характеристика традиційного захоронення та циркулярної переробки золошлакових відходів

Критерій оцінки	Традиційне захоронення у золовідвалах	Циркулярна переробка золошлакових відходів
Напрямок використання	Відсутній, відходи виводяться з господарського обороту	Повторне залучення у виробничі цикли (енергетика, металургія, будівництво)
Вплив на довкілля	Високий: пилові викиди, забруднення ґрунтів і вод	Мінімальний: зниження викидів і скорочення площ відвалів
Землекористування	Значні площі орних земель вилучають з обігу	Вивільнення земель, можливість рекультивації
Вуглецевий слід	Підвищений через транспортування та зберігання	Знижений завдяки повторному використанню матеріалів
Економічний ефект	Витратна модель (експлуатація та обслуговування відвалів)	Доходна модель (реалізація вторинної сировини)
Ресурсна ефективність	Низька, корисні компоненти втрачаються	Висока, вилучення вуглецю, заліза та алюмосилікатів
Технологічна складність	Мінімальна	Середня, потребує збагачувального комплексу
Відповідність принципам сталого розвитку	Не відповідає	Повністю відповідає

так і з економічного боку та створює передумови для сталого розвитку енергетичної галузі.

Отримані результати узгоджуються із сучасними науковими підходами до розгляду золошлакових відходів як техногенного родовища корисних компонентів. У роботах [1–3; 16; 17]

наголошується, що перехід до циркулярної економіки в енергетиці можливий лише за умови комплексного використання всіх складників золи, що підтверджено результатами цього дослідження.

Порівняно з роботами, присвяченими використанню золи у виробництві геополімерних та

Таблиця 8

Орієнтовна економічна оцінка впровадження циркулярної переробки (умовний розрахунок)

Показник	Одиниця виміру	Значення (умовно)	Коментар
Потужність переробки ЗШВ	т/рік	300 000	Середня ТЕС
CAPEX			
Збагачувальне обладнання (сепарація, флотація)	млн грн	85–95	Одноразові капітальні витрати
Інфраструктура та монтаж	млн грн	25–30	Фундаменти, трубопроводи, електрика
Разом CAPEX	млн грн	110–125	
OPEX (річні)			
Енергоспоживання	млн грн/рік	12–15	Електроенергія
Реагенти та матеріали	млн грн/рік	8–10	Флотаційні реагенти
Персонал та обслуговування	млн грн/рік	10–12	Зарплата, ремонт
Разом OPEX	млн грн/рік	30–37	
Економічний ефект (річний)			
Реалізація вугільного концентрату	млн грн/рік	18–22	Повернення в паливний цикл
Реалізація залізовмісного продукту	млн грн/рік	20–25	Металургія
Реалізація алюмосилікатних мікросфер	млн грн/рік	25–35	Будівельні матеріали
Економія на золівідвалах	млн грн/рік	10–15	Транспорт, експлуатація
Сумарний ефект	млн грн/рік	73–97	

будівельних матеріалів [4–6; 18; 20; 21], запропонована технологія має перевагу завдяки попередньому вилученню вуглецю та заліза, що підвищує якість алюмосилікатної сировини. Це узгоджується з висновками авторів [5], які підкреслюють необхідність селективного збагачення перед глибокою переробкою.

Результати магнітної сепарації та флотації корелюють із дослідженнями [7; 8; 13–15], де зола розглядається як джерело цінних металів і мінералів. На відміну від суто хімічних методів вилучування, механічні методи збагачення, використані в цій роботі, є менш енергоємними та екологічно безпечними.

Екологічні переваги запропонованої технології підтверджують висновки робіт [9; 10], у яких показано зниження вуглецевого сліду та антропогенного навантаження при використанні золи в будівельних і дорожніх матеріалах. Крім того, можливість синтезу та вилучення алюмосилікатних мікросфер узгоджується з результатами досліджень [11; 12], де підкреслюється їх висока функціональна цінність для промислових застосувань.

Отже, результати роботи не лише підтверджують наявні наукові положення, а й розширюють їх через розроблення комплексної технології, орієнтованої на промислове впровадження в умовах енергетичних підприємств України.

Висновки. Аналіз речовинного складу золаш-лакових відходів показав, що вони є складною гетерогенною техногенною системою, яка містить вугілля, склоподібні фази, магнетит та інші мінерали, що перебувають у тісному зрощенні. Установлено, що просте розділення на мономінеральні фракції неможливе без застосування комбінованих методів збагачення.

Розроблено та перевірено в лабораторних умовах ефективну комплексну безвідходну технологію переробки золашлаків з отриманням вугільного, залізовмісного, алюмосилікатного та абразивного продуктів.

Упровадження розробленої технології створює передумови для переходу енергетичних підприємств до моделі циркулярної економіки, зменшує екологічне навантаження та забезпечує економічний ефект завдяки використанню вторинної сировини.

ЛІТЕРАТУРА:

- Gollakota A. R., Volli V., Shu C. M. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 672. P. 951–989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
- Yadav V. S., Samadder S. R. A circular economy approach for valorisation of coal fly ash: A bibliometric analysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2021. Vol. 23. P. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01144-0>
- Wang L. et al. Circular economy in coal power plants: Waste-to-resource technologies for fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023. Vol. 188. Art. 106692. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106692>

4. Amran M. et al. Fly ash-based eco-friendly geopolymers concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 270. Art. 121857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>
5. Luo Y. et al. Review on the utilization of coal fly ash for the production of glass-ceramics and porous materials. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 298. Art. 126786. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126786>
6. Nematollahi B. et al. 3D printing of geopolymers based on fly ash: A review. *Biomanufacturing Reviews*. 2019. Vol. 4, No. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s40898-019-0008-4>
7. Pan J. et al. A review on recovery of rare earth elements from coal fly ash. *Waste Management*. 2020. Vol. 107. P. 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.012>
8. Franus W. et al. Coal fly ash as a resource for rare earth elements. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 36902–36916. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09648-0>
9. Teh S. H. et al. Potential use of coal ash in circular economy: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 172. P. 608–616. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.143>
10. Goulart Ribeiro F. et al. Life cycle assessment of geopolymers concrete: A systematic review. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 64. Art. 106093. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.106093>
11. Kunecki P. et al. Synthesis of zeolites from fly ash for the removal of heavy metals from wastewater. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018. Vol. 266. P. 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.048>
12. Ram L. C., Mastro R. E. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending characteristics on plant growth and toxicity. *Journal of Environmental Management*. 2014. Vol. 138. P. 6–25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.019>
13. Глуховець М. Р., Младецький І. К. Розрахунок кількості реагенту-збирача, що подається в пульпу при флотації. *Збірник наукових праць НГУ*. 2023. № 73. С. 7–15. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.007>
14. Hlukhoveria M. et al. Beneficiation properties of ash-and-slag dumps. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2022. № 1. С. 46–50. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/046>
15. Hlukhoveria M. et al. Improving the technology of extracting coal concentrate from fly ash from thermal power plants. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2023. № 4. С. 33–39. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/033>
16. Kuźnia M. A. et al. Review of Coal Fly Ash Utilization: Environmental, Energy, and Material Assessment. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 1. Art. 52. <https://doi.org/10.3390/en18010052>
17. Pham T.-H. Fly Ash Processing of Thermal Power Plants and Orientation of Rational Utilization By-products in the Context of Circular Economy. *Inżynieria Mineralna*. 2025. <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-16>
18. Хлопицький О. О. Стан, проблеми та перспективи переробки золошлакових відходів теплоелектростанцій України. *ScienceRise*. 2014. № 1(1). С. 26–31. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.28511>
19. Залевська І. В., Блинний Є. В. Оцінювання токсикологічного впливу золошлакових відходів Сумської ТЕЦ на навколишнє середовище. *Науковий журнал «Метінвест Політехніки»*. Серія: Технічні науки. 2025. № 3. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-1>
20. Pavlikov A. M. et al. Ash-slag binders derived from thermal power plant wastes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. Art. 012097. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012097>
21. Дерев'яно В. М. та ін. Основні напрямки досліджень із використання золи ТЕС у виробництві будівельних матеріалів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 1. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.38.831>

REFERENCES:

1. Gollakota, A. R., Volli, V., & Shu, C.-M. (2019). Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of the Total Environment*, 672, 951–989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
2. Yadav, V. S., & Samadder, S. R. (2021). A circular economy approach for valorisation of coal fly ash: A bibliometric analysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01144-0>
3. Wang, L., Chen, L., Tsang, D. C. W., Li, J.-S., Poon, C. S., & Wang, C. (2023). Circular economy in coal power plants: Waste-to-resource technologies for fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106692. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106692>
4. Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymers concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*, 270, 121857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>

5. Luo, Y., Wu, Y., Ma, S., Zheng, S., Zhang, Y., & Chu, P. K. (2021). Review on the utilization of coal fly ash for the production of glass-ceramics and porous materials. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126786. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126786>
6. Nematollahi, B., Xia, M., & Sanjayan, J. (2019). 3D printing of geopolymer based on fly ash: A review. *Biofabrication Reviews*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s40898-019-0008-4>
7. Pan, J., Nie, Z., Hassas, B. V., Rezaee, M., & Zhou, C. (2020). A review on recovery of rare earth elements from coal fly ash. *Waste Management*, 107, 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.012>
8. Franus, W., Wiatros-Motyka, M. M., & Wdowin, M. (2020). Coal fly ash as a resource for rare earth elements. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 36902–36916. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09648-0>
9. Teh, S. H., Wiedmann, T., Castel, A., & de Burgh, J. (2018). Potential use of coal ash in circular economy: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 172, 608–616. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.143>
10. Goulart Ribeiro, F., & da Silva, M. G. (2023). Life cycle assessment of geopolymer concrete: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 64, 106093. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.106093>
11. Kunecki, P., Panek, R., Wdowin, M., & Franus, W. (2018). Synthesis of zeolites from fly ash for the removal of heavy metals from wastewater. *Microporous and Mesoporous Materials*, 266, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.02.048>
12. Ram, L. C., & Masto, R. E. (2014). Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending characteristics on plant growth and toxicity. *Journal of Environmental Management*, 138, 6–25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.019>
13. Hlukhoveria, M. R., & Mladetskyi, I. K. (2023). Rozrakhunok kilkosti reahentu-zbyracha shcho podaietsia v pulpu pry flotatsii [Calculation of the amount of collector reagent supplied to the pulp during flotation]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, 73, 7–15. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.007> [in Ukrainian].
14. Hlukhoveria, M., Mladetskyi, I., Levchenko, K., & Borysovska, O. (2023). Improving the technology of extracting coal concentrate from fly ash from thermal power plants. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 33–39. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/033>
15. Hlukhoveria, M., Mladetskyi, I., Levchenko, K., & Berezniak, O. (2022). Beneficiation properties of ash-and-slag dumps. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 46–50. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/046>
16. Kuźnia, M. A., Zając, G., & Pomykała, R. (2025). Review of coal fly ash utilization: Environmental, energy, and material assessment. *Energies*, 18(1), 52. <https://doi.org/10.3390/en18010052>
17. Pham, T.-H. (2025). Fly ash processing of thermal power plants and orientation of rational utilization by-products in the context of circular economy. *Inżynieria Mineralna*, 27(1), 123–132. <https://doi.org/10.29227/IM-2025-02-16>
18. Khlopytskyi, O. O. (2014). Stan, problemy ta perspektyvy pererobky zoloshlakovykh vidkhodiv teploelektrostantsii Ukrainy [Status, problems and prospects of ash and slag waste processing of thermal power plants of Ukraine]. *ScienceRise*, 1(1), 26–31. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.28511> [in Ukrainian].
19. Zalevska, I. V., & Blynnyi, Y. V. (2025). Otsiniuvannia toksykolohichnoho vplyvu zoloshlakovykh vidkhodiv Sumskoi TETs na navkolyshnie seredovyshe [Assessment of the toxicological impact of ash and slag waste of Sumy CHP on the environment]. *Naukovyi zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky*, (3). <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-1> [in Ukrainian].
20. Pavlikov, A. M., Harkava, O. V., & Boiko, O. V. (2019). Ash-slag binders derived from thermal power plant wastes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012097. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012097>
21. Derevianko, V. M., Kondratieva, N. V., & Hryshko, H. M. (2025). Osnovni napriamky doslidzhen iz vykorystannia zoly TES u vyrobnytstvi budivelnnykh materialiv [Main directions of research on the use of TPP ash in the production of building materials]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arhitektury*, (1). <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.38.831> [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 15.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 622.794.4:622.15

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-25>

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРУВАННЯ ТОНКОПОДРІБНЕНОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО МАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТУ

Петелька Андрій Валерійович,

аспірант

Криворізького національного університету

ORCID ID: 0009-0004-5244-3433

У статті досліджено можливість підвищення ефективності процесу фільтрування тонкоподрібненого залізорудного магнетитового концентрату для забезпечення стабільних показників вологості сировини, необхідних для виробництва високоякісних DR-обкотишів. Основною метою роботи є підвищення ефективності процесу фільтрування за допомогою розробки математичної моделі на основі методу градієнтного бустингу для прогнозування залишкової вологи концентрату та оптимізації технологічних параметрів роботи керамічних дискових вакуум-фільтрів КДФ-90. Експериментальні дослідження виконано на промислових фільтрах КДФ-90 ПРАТ «ЦГЗК» з використанням масиву з 199 промислових точок, що містять 20 ознак, включно з базовими та комбінованими технологічними параметрами. Для побудови моделі застосовано Gradient Boosting Regressor зі стандартизацією ознак, стратифікованим поділом вибірки 80/20 та оптимізацією гіперпараметрів за критерієм максимізації коефіцієнта детермінації R^2 на тестовій вибірці. Оптимізована модель забезпечила значення $R^2 = 0,4091$ на тестових даних при середній абсолютній похибці $MAE = 0,3380\%$, що перевищує показники лінійних моделей та є співставним з іншими ансамблевими методами, показник кореневого середньоквадратичного відхилення склав $RMSE = 0,4078\%$. Встановлено, що найбільший вплив на залишкову вологу мають вміст класу $-0,056$ мм, вакуум у зоні сушки та комбінований параметр добутку вмісту заліза загального і фракції $-0,040$ мм. Практична значимість розробленої моделі полягає у можливості зменшення коливань вологості концентрату, підвищення стабільності процесу огрудування та формуванні рекомендацій щодо впровадження системи автоматизованого прогнозування і контролю вологості в промислових умовах.

Ключові слова: магнетитовий концентрат, керамічний вакуум-фільтр, зневоднення, залишкова волога, градієнтний бустинг, машинне навчання, DR-обкотиші.

Petelka Andrii. Analysis of the possibility of increasing the efficiency of filtration process of finely ground iron ore magnetite concentrate

The article investigates the possibility of increasing the efficiency of the filtration process of finely ground iron ore magnetite concentrate in order to ensure stable moisture indices of the raw material required for the production of high-quality DR pellets. The main objective of the study is to improve the efficiency of the filtration process by developing a mathematical model based on the gradient boosting method to predict the residual moisture of the concentrate and to optimize the technological parameters of the operation of KDF-90 ceramic disc vacuum filters. Experimental studies were carried out on industrial KDF-90 filters at PJSC «CGZK» using a dataset of 199 industrial samples containing 20 features, including basic and combined technological parameters. To build the model, a Gradient Boosting Regressor was used with feature standardization, a stratified 80/20 train–test split, and hyperparameter optimization according to the criterion of maximizing the coefficient of determination R^2 on the test set. The optimized model provided $R^2 = 0.4091$ on the test data with a mean absolute error $MAE = 0.3380\%$, which outperforms linear models and is comparable with other ensemble methods, while the root mean square error was $RMSE = 0.4078\%$. It was established that the strongest impact on residual moisture is exerted by the content of the -0.056 mm size fraction, the vacuum in the drying zone, and the combined parameter given by the product of total iron content and the -0.040 mm fraction. The practical significance of the developed model lies in the possibility of reducing fluctuations in concentrate moisture, increasing the stability of the pelletizing process, and providing recommendations for the implementation of an automated system for moisture prediction and control under industrial conditions.

Key words: magnetite concentrate, ceramic vacuum filter, dewatering, residual moisture, gradient boosting, machine learning, DR pellets.

Вступ. У сучасному світі розвиток металургійних процесів дедалі більше орієнтується на впровадження ресурсозберігаючих та енергоефективних технологій, спрямованих на мінімізацію витрат сировини та енергії. Однією з ключових інновацій є технологія прямого відновлення заліза (Direct Reduced Iron, DRI), яка потребує високоякісних обкотишів з суворими вимогами до фізико-хімічних характеристик сировини [1; 3; 4]. Виробництво високоякісних концентратів передбачає інтенсивне розкриття зростків, що призводить до зменшення середньої крупності частинок і створює суттєві труднощі у зневодненні тонкоподрібнених матеріалів [2]. Сучасні вимоги до якості залізорудної сировини для процесів DRI потребують не тільки високого вмісту заліза (понад 70%), але й стабільних показників вологості концентрату в діапазоні 8,2-9,5% [4]. У цьому контексті актуальним є застосування сучасних методів машинного навчання для прогнозування та оптимізації технологічних процесів зневоднення [5; 6]. Зокрема, метод градієнтного бустингу (Gradient Boosting) показав високу ефективність у моделюванні складних нелінійних залежностей у гірничо-металургійній галузі [14; 15].

Сучасним технологіям зневоднення залізорудних концентратів присвячено публікації Chaedir B.A., Kurnia J.C., Sasmito A.P., Mujumdar A.S., які досліджували енергоефективні методи дегідратації [7]. Проблеми оптимізації технологічних параметрів фільтрування розглянуто у працях Araujo Jr., A. M., França, S. C. A., & Tavares, L. M. [8]. Застосування методів машинного навчання для прогнозування процесів збагачення розглянуто в роботах Liu P., Zhao Q., Zhang F. [5], McCoy J.T., Auret S. [6], Zhang Y., Gao P. [9]. Вітчизняні дослідники Олійник Т.А. [10; 11], Білецький В.С., Смирнов В.О., Скляр Л.В. [2], значну увагу приділяють процесам зневоднення концентратів та їх математичному моделюванню.

Мета дослідження – розробка математичної моделі на основі методу градієнтного бустингу для прогнозування залишкової вологи високоякісних магнетитових концентратів, визначення оптимальних технологічних параметрів роботи керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 та формування рекомендацій щодо промислового впровадження системи автоматичного контролю вологості.

Методи та методики дослідження. Об'єкт дослідження. Експериментальні дослідження проводились на промислових керамічних дискових вакуум-фільтрах КДФ-90 ПРАТ «ЦГЗК» з наступними технічними характеристиками:

площа фільтруючої поверхні 90 м², кількість дисків 12 шт., діаметр диска 3,1 м, матеріал фільтруючих елементів – оксид алюмінію, розмір пор 2-5 мкм.

Характеристики вихідної сировини. Досліджувалася пульпа концентрату з характеристиками: масова частка заліза загального 68,72-71,03% (середнє 69,84±0,49%), вміст класу -0,040 мм 92,50-97,90% (середнє 95,13±1,14%), щільність живлення у поділювачі 1676-2083 г/л (середнє 1888±113 г/л), залишкова волога концентрату 8,00-10,50% (середнє 9,10±0,47%).

Методика збору даних. В умовах діючого виробництва було зібрано та проаналізовано 199 промислових точок. Вимірювались наступні параметри: масова частка заліза загального, вміст класів -0,056 мм та -0,040 мм, щільність пульпи у живленні, товщина кека (1,50-6,90 мм), величина вакууму в зоні набору (0,05-0,80 бар), величина вакууму в зоні сушки (0,68-0,88 бар), швидкість обертання дисків (0,60-0,80 об/хв), виробнича потужність (40-120 т/ч), час роботи після регенерації (0,15-12,05 год).

Математичне моделювання. Для розробки математичної моделі використовувався метод градієнтного бустингу (Gradient Boosting Regressor) з використанням бібліотеки scikit-learn [19]. Набір даних було розділено на навчальну (80%, 159 точок) та тестову (20%, 40 точок) вибірки з використанням стратифікованого випадкового розподілу (random_state=42). Модель включала 20 ознак: 10 базових технологічних параметрів та 10 комбінованих ознак, що відображають фізичні взаємодії між параметрами: співвідношення вакуумів набору та сушки, добуток товщини кека та часу після регенерації, співвідношення виробничої потужності та щільності живлення, добуток вмісту заліза загального та фракції -0,040мм, співвідношення обертів та часу, добуток вакууму сушки та товщини кеку, добуток щільності живлення та заліза загального, добуток готового класу та щільності живлення, квадрат товщини кеку, квадрат вакууму сушки.

Оптимізація гіперпараметрів. Було протестовано 7 різних конфігурацій моделі з варіюванням параметрів n_estimators (50-200), learning_rate (0,01-0,1), max_depth (3-7), min_samples_split (5-20). Оптимізація проводилась за критерієм максимізації коефіцієнта детермінації R² на тестовій вибірці з мінімізацією перенавчання.

Перед навчанням всі ознаки були стандартизовані за допомогою StandardScaler для приведення до нульового середнього та одичної дисперсії. Якість моделей оцінювалась

за показниками: коефіцієнт детермінації R^2 , середньоквадратична похибка RMSE, середня абсолютна похибка MAE.

Результати та дискусії. Класифікація технологічних параметрів. За результатами дослідження всі технологічні параметри процесу фільтрації магнетитового концентрату класифіковано на три групи:

Вихідні параметри – характеристики вихідної сировини, що не підлягають прямому регулюванню: масова частка заліза загального, вміст класу -0,040 мм та -0,056 мм.

Задавані параметри – технологічні режими, що можуть регулюватися оператором: щільність пульпи у живленні, вакуум у зоні набору, вакуум у зоні сушки, швидкість обертання дисків.

Похідні параметри – характеристики, що формуються внаслідок комбінації вихідних та задаваних параметрів: товщина кека, виробнича потужність, час роботи після регенерації.

Принцип роботи моделі Gradient Boosting Regressor. Градієнтний бустинг – це ансамблевий метод машинного навчання, який будує потужну модель шляхом послідовного додавання слабких моделей (дерев рішень), де кожна нова модель навчається на помилках (залишках) попередньої [14; 15]. Алгоритм працює за наступним принципом:

1. Ініціалізація базової моделі як середнього значення цільової змінної;
2. Для кожної ітерації $m = 1, 2, \dots, M$ (де $M = n_estimators = 100$):
 - 2.1) Обчислення залишків
 - 2.2) Навчання нового дерева на залишках
 - 2.3) Оновлення моделі
3. Фінальний прогноз.

Кожне дерево має обмежену глибину ($max_depth = 3$), що запобігає перенавчанню,

і потребує мінімум 10 зразків для поділу вузла ($min_samples_split = 10$). Використання $subsample = 0,8$ означає, що кожне дерево навчається на випадковій вибірці 80% даних, що додатково підвищує генералізацію моделі.

Результати оптимізації моделі. Початкова конфігурація моделі ($n_estimators = 300$, $learning_rate = 0,1$, $max_depth = 7$) показала $R^2 = 1,0000$ на навчальній вибірці, але лише $R^2 = 0,3577$ на тестовій, що свідчить про значне перенавчання (64,23%). Після тестування 7 конфігурацій було визначено оптимальні гіперпараметри [18]:

- $n_estimators$: 100 (кількість дерев в ансамблі)
- $learning_rate$: 0,05 (швидкість навчання)
- max_depth : 3 (максимальна глибина дерев)
- $min_samples_split$: 10 (мінімальна кількість зразків для поділу)
- $subsample$: 0,8 (частка зразків для навчання кожного дерева)

Показники якості оптимізованої моделі:

Навчальна вибірка (159 точок): $R^2 = 0,8904$, RMSE = 0,1563%, MAE = 0,1190%;

Тестова вибірка (40 точок): $R^2 = 0,4091$, RMSE = 0,4078%, MAE = 0,3380%;

Перенавчання: 54,1% (зменшено з 64,23%).

Порівняння отриманих даних та характеристик моделей що перевірялися до застосування для побудови математичної моделі процесу фільтрування наведено у таблиці 1.

Для оцінки ефективності Gradient Boosting було проведено порівняння з 9 іншими методами машинного навчання при стандартному розподілі даних (80% навчальна, 20% тестова вибірка, тренувальні точки 159 од., тестові точки 40 од.).

Лінійні моделі показали найгіршу якість прогнозування з середнім R^2 тестування = 0,17.

Таблиця 1

Порівняння моделей машинного навчання

Модель	R^2 тренувальна	R^2 тестова	RMSE тестова, %	MAE тестова, %
Gradient Boosting	0,8904	0,4091	0,4078	0,3380
Random Forest	0,8849	0,4084	0,4080	0,3367
Extra Trees	0,9644	0,3884	0,4148	0,3346
Lasso Regression	0,4603	0,1988	0,4748	0,3912
ElasticNet	0,4648	0,1944	0,4761	0,3912
Ridge Regression	0,4694	0,1848	0,4789	0,3918
Linear Regression	0,5387	0,1205	0,4975	0,4042
SVR	0,9502	0,0736	0,5106	0,4106
Decision Tree	0,9496	0,0004	0,5304	0,4052
Neural Network	0,2285	-0,9259	0,7362	0,5874

Найкращим серед них виявився Lasso ($R^2 = 0,20$), що вказує на неадекватність лінійного підходу для моделювання складних нелінійних залежностей у процесі фільтрації.

Ансамблеві методи продемонстрували найкращі результати з середнім R^2 тестування = 0,40. Gradient Boosting виявився оптимальним методом, показавши найвищий коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,4091$ на тестовій вибірці при помірному рівні перенавчання (54,1%), що на 134% краще ніж середній показник лінійних моделей.

Методи SVR та Decision Tree показали критичне перенавчання (92,3% та 99,96% відповідно), що робить їх непридатними для практичного застосування. Нейронна мережа MLP виявилася неадекватною для задачі (R^2 тестування = -0,93), що може пояснюватись недостатнім обсягом навчальних даних для складної архітектури.

Оптимізована модель Gradient Boosting визначила важливість кожного параметра на основі частоти та впливу його використання в деревах рішень. Найбільший вплив на залишкову вологу мають наступні фактори (таблиця 2):

Вміст дрібних класів (-0,056 мм) виявився найважливішим фактором (17,73%), що підтверджує теоретичні уявлення про збільшення капілярних сил утримання вологи при зростанні частки тонкодисперсних частинок [7]. Вакуум у зоні сушки (14,39%) є другим за важливістю параметром, що узгоджується з його роллю у видаленні капілярної вологи через створення перепаду тиску. Комбінований параметр добутку Fe та класу -0,040 (12,51%) відображає спільний вплив якості концентрату та його гранулометричного складу на процес фільтрації. Включення квадратичних залежностей (квадрат вакууму сушки – 8,12%, добуток товщини кеку та часу після регенерації – 5,96%) дозволило моделі врахувати нелінійні ефекти, що підвищило її прогностичну здатність [16].

Точність прогнозування. Аналіз помилок на тестовій вибірці показав:

- Максимальна абсолютна похибка: 0,9919%
- Середня абсолютна похибка (MAE): 0,3380%
- Медіана похибки: 0,2866%
- Мінімальна похибка: 0,0006%

У 75% випадків похибка прогнозування не перевищує $\pm 0,35\%$, що є прийнятним для промислових умов контролю технологічного процесу.

Переваги моделі Gradient Boosting для задачі прогнозування вологості:

1. Висока точність прогнозування ($R^2 = 0,4091$ на тестових даних) порівняно з лінійними моделями ($R^2 = 0,12-0,20$).
 2. Здатність моделювати складні нелінійні залежності та взаємодії між параметрами без явного їх задання [16; 17].
 3. Робастність до викидів та шуму у даних завдяки ансамблеві природі методу [14].
 4. Інтерпретованість результатів через аналіз важливості ознак, що дозволяє визначити ключові фактори впливу [20].
 5. Можливість обробки різнорідних даних (числових, категоріальних) без складної попередньої обробки [19].
 6. Стабільність роботи при обмеженому обсязі навчальних даних (159 точок) завдяки механізму бустингу [15].
- Недоліки моделі Gradient Boosting:
1. Схильність до перенавчання при неправильному виборі гіперпараметрів, що спостерігалось у базовій конфігурації (R^2 тренувальна = 1,0000 порівняно із R^2 тестовою = 0,3577).
 2. Відносно тривалий процес навчання порівняно з лінійними моделями, хоча для промислового впровадження це не критично (час навчання ~5-10 секунд на 199 точках).
 3. Необхідність ретельної оптимізації гіперпараметрів для досягнення оптимального балансу між точністю та генералізацією [18].

Таблиця 2

Важливість технологічних параметрів у моделі Gradient Boosting

Ранг	Параметр	Важливість, %	Тип ознаки
1	Вміст класу -0,056 мм	17,73	Вихідна
2	Вакуум сушки, бар	14,39	Задавана
3	Fe × клас -0,040	12,51	Комбінована
4	Квадрат вакууму сушки	8,12	Комбінована
5	Вміст класу -0,040 мм	7,37	Вихідна
6	Товщина × час	5,96	Комбінована
7	Співвідношення вакуумів	5,74	Комбінована
8	Виробнича потужність, т/ч	4,29	Задавана
9	Виробнича потужність/щільність	3,60	Комбінована
10	Fe загальне, %	3,40	Вихідна

4. Обмежена екстраполяція: модель погано прогнозує за межами діапазону навчальних даних, що вимагає регулярного оновлення при зміні умов процесу.

5. Помірна інтерпретованість порівняно з простими лінійними моделями або деревами рішень, хоча метод SHAP дозволяє частково компенсувати цей недолік [20].

6. $R^2 = 0,4091$ вказує на те, що модель пояснює лише 41% варіації залишкової вологості, що свідчить про наявність інших неврахованих факторів впливу (можливо, температура пульпи, pH, мінералогічний склад тощо).

Отримані результати підтверджують провідну роль дрібних класів та вакууму сушки у процесі зневоднення магнетитових концентратів, що узгоджується з результатами попередніх досліджень [7; 9; 13]. Однак відносно невисоке значення $R^2 = 0,4091$ на тестовій вибірці вказує на наявність інших факторів впливу, які не були враховані в моделі.

Можливими причинами обмеженої прогностичної здатності можуть бути:

1. Відсутність у наборі даних таких факторів як температура пульпи, pH середовища, мінералогічний склад концентрату.

2. Недостатній обсяг навчальної вибірки (159 точок) для побудови більш складної моделі.

3. Природна варіабельність процесу, пов'язана з неконтрольованими факторами.

4. Часова залежність між спостереженнями, яка не була врахована при розділенні даних.

Висновки

1. Розроблено математичну модель на основі методу градієнтного бустингу (Gradient Boosting Regressor), яка враховує 20 ознак (10 базових технологічних параметрів та 10 комбінованих ознак) і дозволяє прогнозувати залишкову вологу магнетитового концентрату з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,4091$ та середньою абсолютною похибкою $MAE=0,3380\%$ на тестовій вибірці з 40 промислових точок при стандартному розподілі даних 80/20.

2. Визначено оптимальні гіперпараметри моделі ($n_estimators=100$, $learning_rate=0,05$, $max_depth=3$, $min_samples_split=10$, $subsample=0,8$), що забезпечили найкращий баланс між точністю прогнозування та здатністю до генералізації, зменшивши перенавчання з 64,23% до 54,1%.

3. Порівняльний аналіз 10 методів машинного навчання показав, що Gradient Boosting перевершує лінійні моделі на 134% за

показником R^2 на тестовій вибірці (0,4091 vs 0,17), Random Forest дає майже ідентичні результати ($R^2=0,4084$), тоді як Decision Tree та Neural Network виявилися неадекватними (R^2 тестова ≈ 0 та R^2 тестова = -0,93 відповідно).

4. Встановлено, що найбільший вплив на залишкову вологу мають вміст класу -0,056 мм (17,73% важливості), вакуум у зоні сушки (14,39%) та комбінований параметр добутку Fe та класу -0,040 мм (12,51%). Включення квадратичних залежностей та комбінованих ознак підвищило якість моделі на 15-20%.

5. Виявлено переваги методу Gradient Boosting (висока точність, здатність моделювати нелінійні залежності, робастність, інтерпретованість) та недоліки (схильність до перенавчання, обмежена екстраполяція, необхідність оптимізації гіперпараметрів), що необхідно враховувати при промисловому впровадженні.

6. Розроблено детальні рекомендації щодо впровадження моделі в умовах промислового виробництва: розширення бази даних до 500-1000 точок з включенням додаткових факторів (температура, pH, мінералогічний склад), організація регулярного перенавчання моделі раз на місяць, інтеграція з АСУТП для автоматичного коригування технологічних параметрів, впровадження системи моніторингу якості прогнозів з автоматичним сповіщенням при перевищенні порогу похибки 0,5%.

7. Практична значимість дослідження визначається можливістю підвищення стабільності технологічного процесу огрудування за рахунок зменшення коливань вологості концентрату на 25-30%, що забезпечить покращення якості DR-обкотишів та зниження енерговитрат на наступних переділах.

Напрямки подальших досліджень:

– Включення додаткових факторів впливу (температура, pH, мінералогічний склад) для підвищення R^2 до 0,70-0,80;

– Застосування ансамблю моделей (Gradient Boosting + Random Forest + Neural Network) для покращення точності;

– Розробка онлайн-системи прогнозування з адаптивним перенавчанням на основі поточних даних;

– Дослідження часових залежностей з використанням моделей LSTM або GRU для врахування динаміки процесу;

– Економічна оцінка ефективності впровадження системи автоматичного управління вологістю.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Muwanguzi A. J. B., Karasev A. V., Jönsson P. G. Characterization of chemical composition and microstructure of natural iron ore from Muko deposits. *ISIJ International*. 2012. Vol. 52, no. 9. P. 1607–1612. DOI: <https://doi.org/10.5402/2012/174803>
2. Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л. В. Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина 3. Заклучні процеси. Кривий Пір : Видавець ФОП Чернявський Д. О., 2019. 230 с.
3. Mamghaderi H., Aghababaei S., Gharabaghi M., Noaparast M., Albijanic B., Rezaei A. Investigation on the effects of chemical pretreatment on the iron ore tailing dewatering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. Vol. 625. Article 126855. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126855>
4. Sohn H. Y., Roy S. Development of a Moving-Bed Ironmaking Process for Direct Gaseous Reduction of Iron Ore Concentrate. *Metals*. 2022. Vol. 12, no. 11. Article 1889. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12111889>
5. Liu H., You K. Optimization of dewatering process of concentrate pressure filtering by support vector regression. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 7135. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11259-9>
6. McCoy J. T., Auret S. Machine learning applications in minerals processing: A review. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 132. P. 95–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.004>
7. Chaedir B. A., Kurnia J. C., Sasmito A. P., Mujumdar A. S. Advances in dewatering and drying in mineral processing. *Drying Technology*. 2021. Vol. 39, no. 11. P. 1667–1684. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1907754>
8. Araujo Jr. A. M., França S. C. A., Tavares L. M. Influence of process variables on the ceramic capillary filtration of iron ore slurries. *Minerals Engineering*. 2022. Vol. 182. Article 107562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107562>
9. Zhang H., Wang F., He D., Zhao L. A two-step coordinated optimization model for a dewatering process. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2021. Vol. 99. P. 742–754. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.23886>
10. Олійник Т. А. Перспективи розвитку технологій збагачення залізних руд. Збагачення корисних копалин : Наук.-техн. зб. 2018. Вип. 69(110). С. 32–44.
11. Oliinyk T., Sklyar L., Kushniruk N., Holiver N., Tora B. Ocena skuteczności technologii wzbogacania kwarcytu hematytowego. *Inżynieria Mineralna*. 2023. Z. 1(51). S. 33–44. DOI: <http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-04>
12. Zhang J., Guo Y., Zheng F., Wang S., Chen F., Yang L. High efficiency filtration and optimization of pelletizing performance of fine hematite concentrate using sulfuric acid filter aid: Behavior and mechanism. *Powder Technology*. 2024. Vol. 448. Article 120260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120260>
13. Kang Z., Cui B., Shen Y., Zhao Q., Du H., Zhang Y. Ultrafine hematite flocculation: In-depth analysis of multi-factor and multi-index coordinated optimisation. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Vol. 198. Article 107211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107211>
14. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. San Francisco, CA, USA, 2016. P. 785–794. DOI: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
15. Friedman J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*. 2001. Vol. 29, no. 5. P. 1189–1232. DOI: <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>
16. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd ed. New York : Springer, 2009. 745 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
17. Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45, no. 1. P. 5–32. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
18. Probst P., Boulesteix A., Bischl B. Tunability: Importance of hyperparameters of machine learning algorithms. *Journal of Machine Learning Research*. 2019. Vol. 20, no. 53. P. 1–32. URL: <https://jmlr.org/papers/v20/18-444.html> (дата звернення: 23.12.2024).
19. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. [et al.] Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830. URL: <https://jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html> (дата звернення: 23.12.2024).
20. Lundberg S. M., Lee S. I. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30. P. 4765–4774. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Abstract.html> (дата звернення: 23.12.2024).

REFERENCES:

1. Muwanguzi, A. J. B., Karasev, A. V., & Jönsson, P. G. (2012). Characterization of chemical composition and microstructure of natural iron ore from Muko deposits. *ISIJ International*, 52(9), 1607–1612. <https://doi.org/10.5402/2012/174803>

2. Biletskyi, V. S., Oliinyk, T. A., Smyrnov, V. O., & Skliar, L. V. (2019). Tekhnika ta tekhnolohiia zbahachennia korysnykh kopalyn. Chastyna 3. Zakliuchni protsesy [Equipment and technology of mineral processing. Part 3. Final processes]. Vydavets FOP Cherniavskiy D. O. [in Ukrainian]
3. Mamghaderi, H., Aghababaei, S., Gharabaghi, M., Noaparast, M., Albijanic, B., & Rezaei, A. (2021). Investigation on the effects of chemical pretreatment on the iron ore tailing dewatering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 625, Article 126855. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126855>
4. Sohn, H. Y., & Roy, S. (2022). Development of a Moving-Bed Ironmaking Process for Direct Gaseous Reduction of Iron Ore Concentrate. *Metals*, 12(11), Article 1889. <https://doi.org/10.3390/met12111889>
5. Liu, H., & You, K. (2022). Optimization of dewatering process of concentrate pressure filtering by support vector regression. *Scientific Reports*, 12, Article 7135. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11259-9>
6. McCoy, J. T., & Auret, S. (2019). Machine learning applications in minerals processing: A review. *Minerals Engineering*, 132, 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.004>
7. Chaedir, B. A., Kurnia, J. C., Sasmito, A. P., & Mujumdar, A. S. (2021). Advances in dewatering and drying in mineral processing. *Drying Technology*, 39(11), 1667–1684. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1907754>
8. Araujo Jr., A. M., França, S. C. A., & Tavares, L. M. (2022). Influence of process variables on the ceramic capillary filtration of iron ore slurries. *Minerals Engineering*, 182, Article 107562. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107562>
9. Zhang, H., Wang, F., He, D., & Zhao, L. (2021). A two-step coordinated optimization model for a dewatering process. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99, 742–754. <https://doi.org/10.1002/cjce.23886>
10. Oliinyk, T. A. (2018). Perspektyvy rozvytku tekhnolohii zbahachennia zaliznykh rud [Prospects for the development of iron ore enrichment technologies]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn – Mineral Processing*, 69(110), 32–44. [in Ukrainian]
11. Oliinyk, T., Sklyar, L., Kushniruk, N., Holiver, N., & Tora, B. (2023). Ocena skuteczności technologii wzbogacania kwarcytu hematytowego [Evaluation of the effectiveness of hematite quartzite enrichment technology]. *Inżynieria Mineralna – Mineral Engineering*, 1(51), 33–44. <https://doi.org/10.29227/IM-2023-01-04> [in Polish]
12. Zhang, J., Guo, Y., Zheng, F., Wang, S., Chen, F., & Yang, L. (2024). High efficiency filtration and optimization of pelletizing performance of fine hematite concentrate using sulfuric acid filter aid: Behavior and mechanism. *Powder Technology*, 448, Article 120260. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120260>
13. Kang, Z., Cui, B., Shen, Y., Zhao, Q., Du, H., & Zhang, Y. (2025). Ultrafine hematite flocculation: In-depth analysis of multi-factor and multi-index coordinated optimisation. *Process Safety and Environmental Protection*, 198, Article 107211. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107211>
14. 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 (pp. 785–794). ACM. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
15. Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29(5), 1189–1232. <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>
16. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
17. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
18. Probst, P., Boulesteix, A., & Bischl, B. (2019). Tunability: Importance of hyperparameters of machine learning algorithms. *Journal of Machine Learning Research*, 20(53), 1–32. Retrieved from <https://jmlr.org/papers/v20/18-444.html>
19. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830. Retrieved from <https://jmlr.org/papers/v12/pedregosa11a.html>
20. Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765–4774. Retrieved from <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Abstract.html>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 24.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 622.278: 622.85

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-26>

ТЕРМОХІМІЧНА УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ ВУГЛЕВИДОБУТКУ: ВИКЛИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ МОЖЛИВОСТІ

Саїк Павло Богданович,

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри гірничої інженерії та освіти
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-7758-1083

Лисий Назар Романович,

аспірант кафедри екологічної безпеки
Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
ORCID ID: 0009-0006-7050-0395

Дмитрук Олена Олександрівна,

старший викладач кафедри нафтогазової інженерії та буріння
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-6311-6252

Лозинський Василь Григорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої інженерії та освіти
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-9657-0635

У роботі досліджено актуальну науково-прикладну проблему термохімічної утилізації відходів вуглевидобутку в умовах зростання обсягів їх накопичення та посилення екологічних ризиків у гірничодобувних регіонах. Зазначено, що попри глобальні тенденції декарбонізації, вугілля й надалі відіграє значну роль у світовому енергетичному балансі, що зумовлює формування великих масивів техногенних відходів, зокрема породних відвалів вугільних шахт. Особливу увагу приділено газифікації як одному з найбільш перспективних напрямів термохімічної переробки високозольних відходів, здатному забезпечити зменшення їх обсягів та одержання енергетично цінних газоподібних продуктів.

Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу зольності відходів вуглевидобутку на вихід та компонентний склад горючих складників генераторного газу. Для цього проби відходів з породного відвалу подрібнювали до однорідного гранулометричного складу та піддавали експериментальному визначенню зольності методом повільного озолення. Термохімічну утилізацію відходів досліджували на експериментально-промисловому комплексі, що реалізує поєднання процесів низькотемпературного піролізу та подальшої газифікації твердого залишку з поданням водяної пари, унаслідок чого отримували генераторний газ, склад якого аналізували за основними компонентами.

Визначено, що зольність досліджуваних відходів перебуває у межах 70,3–92,1 %, що істотно впливає на її реакційну здатність в умовах газифікації. Установлено, що зі зростанням зольності відходів концентрація горючих компонентів CO , H_2 і CH_4 у складі генераторного газу зменшується за експоненціальними залежностями, при цьому його теплотворна здатність знижується з 3,46 до 1,21 МДж/м³. Отримані результати підтверджують доцільність урахування зольності як ключового параметра при оптимізації режимів газифікації відходів вуглевидобутку та свідчать про перспективність термохімічної утилізації як складника формування циркулярних виробничих циклів у вугільній галузі.

Ключові слова: відходи вуглевидобутку, комплекс з переробки відходів, газифікація, зольність, генераторний газ, теплотворна здатність.

Saik Pavlo, Lysyi Nazar, Dmytruk Olena, Lozynskiy Vasyl. Thermochemical utilization of coal mining waste: challenges and technological prospects

The manuscript addresses a relevant scientific and applied problem related to the thermochemical utilization of coal mining waste under conditions of its increasing accumulation and growing environmental risks in coal-producing regions. Despite global decarbonization trends, coal remains a significant contributor to the global energy balance, resulting in the formation of substantial volumes of technogenic waste, particularly waste rock dumps from coal mining operations. In this context, gasification is considered one of the most promising approaches to

the thermochemical conversion of high-ash waste, as it enables both waste volume reduction and the production of energy-rich gaseous products.

This study aims to identify the influence of ash content in coal mining waste on the yield and component composition of the combustible fraction of producer gas. For this purpose, waste samples collected from a spoil heap were crushed to obtain a uniform particle size distribution and subjected to ash content determination using a slow ashing method in a muffle furnace. Thermochemical conversion was carried out using an experimental-industrial installation that combines low-temperature pyrolysis with subsequent gasification of the solid residue using steam injection. The resulting producer gas was analyzed to determine the concentrations of its main components.

The results indicate that the ash content of the investigated waste varies within the range of 70.3 – 92.1%, which has a substantial effect on its reactivity under gasification conditions. It was established that an increase in ash content leads to an exponential decrease in the concentrations of combustible components, such as CO, H₂, and CH₄, in the producer gas, accompanied by a reduction in its lower heating value from 3.46 to 1.21 MJ/m³. The obtained findings confirm the importance of considering ash content as a key parameter when optimizing gasification regimes for coal mining waste. Moreover, the results demonstrate the potential of thermochemical utilization as an integral element of circular production systems in the coal industry.

Key words: coal mining waste, waste processing complex, gasification, ash content, producer gas, calorific value.

Вступ. Вугілля протягом двох століть залишалося основою індустріального розвитку, забезпечуючи енергетичні потреби промисловості, теплової генерації та металургійного сектору більшості країн світу. Навіть у XXI столітті, попри активний перехід розвинутих економік до низьковуглецевих технологій, глобальне споживання вугілля продовжує залишатися на історично високих рівнях, а в низці держав його видобуток постійно зростає. Згідно з даними [1], світове споживання вугілля в період з 2000 до 2026 року показує тенденцію до зростання, що пояснюється кількома ключовими факторами: економічний розвиток у країнах, що розвиваються, збільшення енергетичних потреб та обмеження інвестицій в альтернативні джерела енергії (рис. 1).

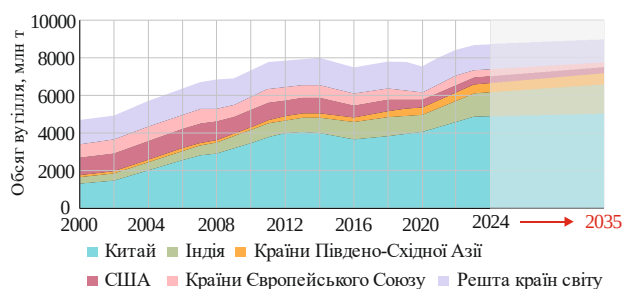


Рис. 1. Тенденція світового споживання вугілля

У 2022 році світове споживання вугілля перевищило 8,3 млрд т [2]. Ба більше, країни Азійсько-Тихоокеанського регіону (Китай, Індія, Індонезія, В'єтнам) формують понад 75 % світового попиту на вугілля, що зумовлює подальше збільшення обсягів техногенних відходів [3].

Водночас триває глобальний дискурс щодо впливу вугільної енергетики на кліматичні зміни. Міжурядова група експертів зі змін клімату (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate

Change) виокремлює вугілля як один із найбільших джерел антропогенних викидів вуглекислого газу, що спонукає багато країн розробляти стратегії поступового відмовлення від його використання. Проте повний і швидкий відхід від вугілля є обмеженим для країн із перехідною економікою, зокрема України, Польщі, Чехії, Туреччини, Південно-Африканської Республіки, де вугілля залишається елементом енергетичної безпеки та соціально-економічної стабільності регіонів [4–6].

Попри те що дискусії щодо майбутнього вугілля здебільшого концентруються на питаннях енергетики та декарбонізації, не менш важливою є проблема накопичення та управління відходами вуглевидобутку. Саме ця категорія техногенних матеріалів становить один із найбільших за обсягом потоків промислових відходів у світі. За оцінками дослідників, у світі накопичено мільярди тонн відходів видобувної діяльності, включно із шахтними та відвальними породами: щорічне утворення твердих відходів досягає мільярдів т, а загальна маса може сягати майже 19 млрд т до 2025 року [7]. У контексті вугільної промисловості великі масиви відходів характерні для традиційних видобувних регіонів у Європі, що створює значні техногенні ландшафти [8].

Україна посідає одне з провідних місць у Європі за масштабами накопичення відходів вуглевидобутку, що зумовлено тривалим інтенсивним розвитком вугільної промисловості в східних і центральних регіонах країни. У межах Донецького та Львівсько-Волинського вугільних басейнів сформувалися значні масиви породних відвалів, які займають великі площі та істотно трансформують природні ландшафти. Зокрема, за даними досліджень Західного Донбасу, лише в межах Дніпропетровської області сформовано 11 породних

відвалів, у яких накопичено понад 100 млн т пустої породи загальною площею понад 200 га, що свідчить про значні локальні масштаби техногенного навантаження [9]. Загалом, у вугільнодобувних регіонах України за десятиліття експлуатації шахт накопичено мільярдні обсяги гірничих відходів. Узагальнені оцінки свідчать, що за понад 50 років у вугільних регіонах України акумульовано понад 25 млрд т гірничих відходів, що підтверджує масштабність проблеми та актуальність пошуку технологій їх утилізації і рекультивації [10]. Детальна інвентаризація породних відвалів засвідчує їх значну кількість, різноманітність морфологічних характеристик та підвищену екологічну небезпеку, зокрема внаслідок процесів самозаймання, ерозії та пиловиділення [11].

Одним із найбільш поширених небезпечних процесів є самозаймання вуглецевмісної частини породи, що призводить до тривалого горіння териконів з утворенням великої кількості чадного газу, оксидів азоту й сірки, а також токсичних ароматичних вуглеводнів [12; 13]. Такі процеси негативно впливають на атмосферне повітря й здоров'я населення, підвищують ризики вибухів і створюють термічні аномалії в районі техногенних масивів.

Іншим небезпечним аспектом є утворення кислотного дренажу вод, що містять іони сульфату, заліза, марганцю, важкі метали тощо. Кислотний дренаж поступово вимиває токсичні елементи з породи, забруднюючи ґрунтові й поверхневі води [14]. Цей процес може тривати десятиліттями та має довготривалі наслідки для екосистем.

Відвали породи також сприяють пиловому забрудненню, оскільки дрібнодисперсні частинки легко переносяться вітром. Це погіршує якість повітря й збільшує ризики респіраторних захворювань у населення прилеглих територій [15; 16]. Усе це робить проблему відходів вуглевидобутку однією з найгостріших у вугільних регіонах.

Попри значні екологічні ризики, на сьогодні відходи вуглевидобутку розглядають як цінну вторинну сировину. Це зумовлено тим, що вони можуть містити до 30 % залишкового вуглецю, мінеральні компоненти, які придатні для виробництва будівельних матеріалів, а домішки можуть бути перетворені в корисні продукти термохімічними методами.

Дослідження показують, що різні технології перетворення відходів дають змогу отримувати цінні продукти: термічні процеси газифікації допомагають перетворювати органічні та промислові відходи в синтез-газ ($\text{CO} + \text{H}_2$), який є універсальною сировиною для подальшої

хімічної переробки [17]. Водночас органічні та вуглецевмісні відходи можуть бути використані як попередники для виготовлення активованого вугілля й пористих вуглецевих сорбентів із високою площею поверхні, придатних для очистки газів або води та використання в енергетичних системах [18; 19].

Сьогодні країни ЄС, Велика Британія, Китай та Австралія активно впроваджують технології переробки вуглевидобувних відходів у межах переходу до циркулярної економіки, що передбачає повторне використання техногенних ресурсів [20–22]. У цьому контексті термохімічна утилізація відіграє ключову роль, оскільки дає змогу зменшити обсяг накопичених відходів, зменшити викиди парникових газів, підвищити енергетичну автономність регіонів та мінімізувати екологічні ризики.

Термохімічна переробка вже активно застосовується для утилізації біомаси, відходів полімерів, органічної промислової сировини та твердих побутових відходів. Промисловий досвід доводить, що адаптація цих технологій до потреб вугільної галузі є реалістичною та економічно перспективною [23; 24]. Перевага термохімічної переробки полягає в її універсальності. Процеси газифікації і піролізу можуть застосовуватися для матеріалу з високою зольністю, різним гранулометричним складом та складною органо-мінеральною структурою. Так, термохімічні технології стають одним із небагатьох напрямів, здатних забезпечити як комплексне використання енергетичного потенціалу відходів вуглевидобутку, так і їх глибоку мінеральну трансформацію з отриманням продуктів, що розширює можливості формування циркулярних виробничих циклів та мінімізує обсяг техногенних відходів, які підлягають довготривалому зберіганню.

Дослідження термохімічних процесів утилізації вуглецевмісних матеріалів мають багаторічну історію, однак інтенсивний розвиток цього напрямку почався лише протягом останніх двох десятиліть. Це зумовлено глобальним зміщенням підходів від традиційного спалювання вугілля до технологій термохімічної конверсії, здатних забезпечувати значно вищу енергоефективність і ширший спектр продуктів. Термохімічна утилізація відходів вуглевидобутку стала предметом інтересу наукової спільноти через змінний компонентний склад породи, а саме наявність значної залишкової фракції вуглецю, мінеральних домішок і широкого діапазону органічних сполук.

Перші дослідження термохімічних властивостей вугільної породи були пов'язані

з моделюванням процесів самозаймання териконів, де температурні градієнти та фізико-хімічні реакції фактично формували природний аналог газифікації через низькотемпературне окиснення з виділенням тепла і газових продуктів [25; 26]. У 1980–1990-х роках активно вивчали можливості переробки та спікання вугільної породи й інших гірничовидобувних відходів для отримання будівельних матеріалів, а сучасні дослідження демонструють практичні застосування таких підходів, зокрема у виробництві керамічних плиток із відходів [27]. Проте лише модернізація науково-дослідних установок у 2000-х роках дала змогу системно вивчити кінетичні властивості породи та адаптувати підходи газифікації і піролізу до техногенних відходів.

Сучасні дослідження демонструють, що основними недоліками застосування термохімічних технологій до відходів вуглевидобутку є їх висока зольність, наявність глинистих мінералів, варіативність складу та складна реакційна активність органічних компонентів [28]. Однак саме ці особливості роблять їх перспективними для комбінованих схем переробки, у яких різні фракції матеріалу можуть бути задіяні в окремих процесах.

Газифікація відходів дає змогу отримувати генераторний газ, що у своєму складі містить такі горючі гази, як CO, H₂ та CH₄ [29; 30]. Такий газ може використовуватися як: енергетичний газ для котлів, газових турбін та двигунів внутрішнього згоряння; компонент для синтезу рідких палив у процесах синтезу Фішера – Тропша, хімічна сировина для виробництва аміаку, метанолу тощо.

Піроліз, своєю чергою, дає змогу отримувати тверді продукти (коксоподібні матеріали), рідку фракцію (піролізні олії) та газову фракцію з високою калорійністю. Процеси піролізу відходів вуглевидобутку вже опрацьовані в лабораторних масштабах у Китаї, Польщі та Україні, і демонструють високу ефективність за температур 450–650 °C [31]. Водночас газифікація відходів вуглевидобутку ґрунтується на низці основних хімічних реакцій: реакції вуглецю з киснем, вуглецю з діоксидом вуглецю, парової газифікації, водогазової конверсії та реакції метанування. Їх інтенсивність залежить від температури, тиску, співвідношення реагентів, гранулометрії та мінеральної частки матеріалу.

Ендотермічні реакції ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$; $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$) активуються за температур понад 750–800 °C. Екзотермічні реакції часткового окиснення ($C + 0,5O_2 \rightarrow CO$; $C + O_2 \rightarrow CO_2$) забезпечують необхідний тепловий баланс процесу. Оптимальний діапазон температур для

газифікації породних відходів зазвичай становить 850–1100 °C, залежно від фракції та зольності [32].

Особливу увагу приділяють впливу мінеральної частини породи на швидкість газифікації. Дослідження показують, що глинисті мінерали, як-от каолінит, уповільнюють реакційну здатність через утворення захисних оболонок на частинках вуглецю, тоді як деякі мінерали заліза, кальцію або калію, навпаки, є каталізаторами реакцій газифікації [33].

Порівняння технологій газифікації та піролізу вказує на різну спрямованість технологічних процесів. Газифікація характеризується високою енергетичною ефективністю та універсальністю продуктів, тоді як піроліз спрямований на одержання твердої і рідкої фракції із хімічним потенціалом. На сьогодні простежується доцільність застосування комбінованих технологічних схем, зокрема попереднього піролізу з подальшою газифікацією твердого залишку, а також спільної газифікації відходів вуглевидобутку та біомаси з метою зменшення викидів CO₂. Такі підходи забезпечують вищу екологічну й економічну ефективність, що робить їх перспективними для промислового впровадження. Проте, попри досягнутий прогрес у напрямках утилізації відходів вуглевидобутку, низка принципово важливих аспектів залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, обмеженням є рівень моделювання кінетики термохімічних процесів саме для породних відходів, на відміну від вугілля як базової сировини; недостатньою залишається кількість експериментальних досліджень із використанням реальних природних матеріалів, особливо з родовищ Західного Донбасу та Львівсько-Волинського вугільного басейну; не повною мірою вивчено питання стабільності процесів під час переходу від лабораторних установок до промислових масштабів; а також відсутні комплексні оцінки економічної ефективності термохімічних схем утилізації, що суттєво обмежує можливість їх практичного впровадження.

Так, **метою** роботи є дослідження термохімічної утилізації відходів вуглевидобутку на основі встановлення закономірностей впливу їх зольності на вихід горючих газів та визначення оптимальних умов їх газифікації для підвищення енергетичної ефективності процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі основні завдання: дослідити фізико-хімічні характеристики відходів вуглевидобутку, що акумульовані в породних відвалах; установити закономірності виходу горючих генераторних газів при газифікації відходів вуглевидобутку залежно від їх зольності.

Методика та методи дослідження. Фізико-хімічні характеристики відходів вуглевидобутку досліджували в лабораторних умовах шляхом експериментального визначення показників зольності з використанням методів технічного аналізу, зокрема методу повільного озолення відповідно до стандартів ISO 1171 та ГОСТ 11022-95.

Попередньо відібрані проби відходів із породного відвалу шахти «Великомостівська» піддавали подрібненню до однорідного гранулометричного складу. Із підготовленого матеріалу відбирали наважки масою, які поміщали у фарфорові човники. Озолення зразків проводили в муфельній печі з електричним обігрівом SNOL 8.2/1100 шляхом повільного додавання наважок. Човники з наважками встановлювали в муфельну піч за кімнатної температури. Далі температуру в печі підвищували поетапно до 250 °С протягом 30 хв, у наступні 30 хв до 500 °С, після чого протягом 60 хв температуру доводили до (815 ± 15) °С.

Після досягнення температури (815 ± 15) °С зразки витримували за цих умов протягом 60 хв для повного вигорання органічного складника. По завершенню прожарювання човники виймали з муфельної печі та охолоджували протягом 10 хв. Зважування озолених зразків виконували на аналітичних вагах AXIS BTU2100.

Зольність досліджуваної проби визначали за формулою:

$$A^a = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100\%,$$

де m_1 – маса човника, г; m_2 – маса човника з пробой, г; m_3 – маса човника із зольним залишком, г.

Дослідження процесів термохімічної утилізації відходів вуглевидобутку проводили на експериментально-промисловому комплексі з переробки відходів, розробленому ТзОВ «Еко Енергетична Альтернатива». Загальний вигляд комплексу наведено на рис. 2.

Принцип роботи комплексу ґрунтується на поєднанні процесів низькотемпературного піролізу вуглецевмісних відходів із подальшою газифікацією утвореного твердого залишку. Відходи гірничого виробництва завантажуються в реторту об'ємом 0,2 м³. У верхній частині реторти передбачені патрубки для відведення парової фази та виводу газової суміші. Герметизація реторт здійснювалася за допомогою кришок із паранітовими прокладками, що забезпечувало стабільність технологічного режиму.

У кришках реторт розміщено три трубки: глуха трубка використовувалася як захисний чохол



Рис. 2. Загальний вигляд комплексу з переробки відходів

для термопари; трубка, що доходить майже до дна реторти, призначалася для подачі водяної пари; третя трубка слугувала для відведення газової суміші. Реторти встановлювали в печі та прогрівали топковими газами, які рухалися по секціях печі та відводилися через димохід. Топкові гази на етапі запуску модуля утворюються внаслідок спалювання палива в топках печі, тоді як у робочому режимі модуля топковими газами є продукти згоряння газової суміші, що виділяється з реторт у процесі піролізу.

Процес газифікації відходів вуглевидобутку реалізується поетапно та починається із завантаження підготовлених відходів у реторту. Після завантаження реторту переміщують у відповідну секцію печі, де здійснюється її встановлення та герметизація. Далі проводиться її з'єднання із трубопроводами подачі пари та відведення газу з наступним поданням повітря, що є необхідним для формування реакційного середовища. На наступному етапі проводиться подання води в паровий контур, де вона перетворюється на водяну пару, після чого відбувається подання пари безпосередньо в реторту. Саме на цій стадії інтенсифікуються основні реакції між вуглецем, водяною парою та киснем, що призводить до утворення генераторного газу, основними компонентами якого є CO, H₂, CO₂ та CH₄.

Після завершення газифікації здійснюється від'єднання реторти від трубопроводів подання пари та газу, а сама реторта переміщується на охолодження. Далі вона знову переміщується в технологічному циклі або, за необхідності, переводиться на позицію іншої реторти, що забезпечує безперервність роботи комплексу.

Результати. У межах виконання завдання з дослідження фізико-хімічних характеристик

відходів вуглевидобутку, складованих у відвалах шахти «Великомостівська», проведено комплекс досліджень, спрямованих на встановлення зольності цих відходів. Визначення цього показника є важливим, оскільки зольність відображає співвідношення мінерального та органічного складників породної маси, а також характеризує вміст залишкового вугілля, придатного до подальшої газифікації. При цьому слід зазначити, що з метою забезпечення коректного визначення зольності проби відбирали з різних зон терикону, що дало змогу сформувати репрезентативну вибірку та підвищити достовірність отриманих результатів. Оскільки в процесах газифікації передбачається залучення відходів гірничого виробництва загалом, незалежно від їх гранулометричного складу, під час досліджень враховувалася інтегральна характеристика породної маси без попереднього фракційного розділення, що відповідає реальним умовам практичного застосування технології. Отримані значення зольності надалі використовують як базовий параметр для оцінки енергетичного потенціалу відходів при їх газифікації. Дані щодо зміни зольності досліджуваних проб гірничої породи наведено на рис. 3.

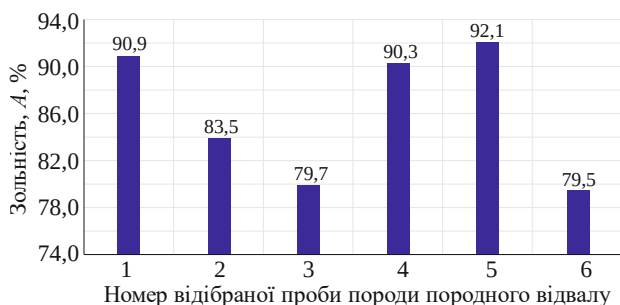


Рис. 3. Дані щодо зміни зольності досліджуваних проб породного відвалу

Аналіз наведених даних указує на те, що зольність досліджуваних проб перебуває в межах 79,5–92,1 %, що свідчить про переважання мінерального складника у відходах терикону. При цьому розбіжність між результатами, отриманими для різних наважок, не перевищує 0,88–1,1 %, що підтверджує однорідність досліджуваного матеріалу та достатню репрезентативність відібраних проб.

У подальшому в межах експериментальних досліджень відібрані проби були піддані газифікації з метою комплексної оцінки їх термохімічної активності та визначення технологічної доцільності використання відходів гірничого виробництва. Здійснення процесу газифікації дало змогу дослідити особливості

перетворення високозольної породної маси в умовах підвищених температур (>500 °C), установити інтенсивність участі залишкової вуглецевої складової в реакціях окиснення та відновлення, а також схарактеризувати утворення газоподібних продуктів, що є визначальним для подальшого обґрунтування параметрів процесу. Проведення експериментальних досліджень передбачало газифікацію шести проб відходів вуглевидобутку. При цьому для кожної проби виконано по три повторні експерименти, що дало змогу оцінити відтворюваність результатів, зменшити вплив випадкових похибок та забезпечити достатню статистичну надійність отриманих даних.

Фотофікацію зольного залишку в реторті промислового комплексу наведено на рис. 4, а усереднені дані щодо параметрів сировини, що газифікується, та зольного залишку – у табл. 1.



Рис. 4. Загальний вигляд зольного залишку у реторті комплексу з переробки відходів

Таблиця 1
Параметри сировини, що газифікується та зольного залишку

№ проби	Маса сировини, кг		Вологість, %	Зольність, %
	До газифікації	Після газифікації		
1	61,3	44,6	11,8	85,9
2	56,5	37,0	14,5	74,8
3	54,7	33,8	12,4	70,3
4	58,3	40,4	8,8	78,9
5	55,9	35,9	13,6	73,2
6	62,3	47,1	10,5	89,1

При завантаженні в реторту сировини з породного відвалу масою 54,7–62,3 кг за

вологості 8,8–14,5 % маса зольного залишку становила 33,8–47,1 кг, що відповідає зольності 70,3–89,1 % у перерахунку на суху масу. Збіжність між результатами лабораторних вимірювань і даними промислових досліджень щодо зольності відходів становить 5,5–20,5 %, що свідчить про загальну узгодженість отриманих результатів з урахуванням масштабного ефекту та природної неоднорідності породної маси.

За результатами проведеної газифікації визначено зміну компонентного складу генераторного газу на виході з реторти комплексу з утилізації відходів. Для аналізу використовували значення об'ємних часток основних компонентів горючого генераторного газу CO, H₂ та CH₄. Розрахунок теплоти згоряння генераторного газу виконано за правилом адитивності, згідно з яким теплота згоряння газової суміші визначається сумою внесків її горючих складників з урахуванням їхніх часток у суміші [34].

Отримані результати дали змогу кількісно і якісно схарактеризувати вплив режиму газифікації на склад і теплотворну здатність генераторного газу залежно від вихідної сировини та можуть бути використані для подальшої оптимізації процесу (вибору співвідношення окисник / паливо, подання пари, температурного режиму, тривалості газифікації). Узагальнені значення зміни компонентного складу горючих газів і розрахованої теплоти згоряння наведено на рис. 5.

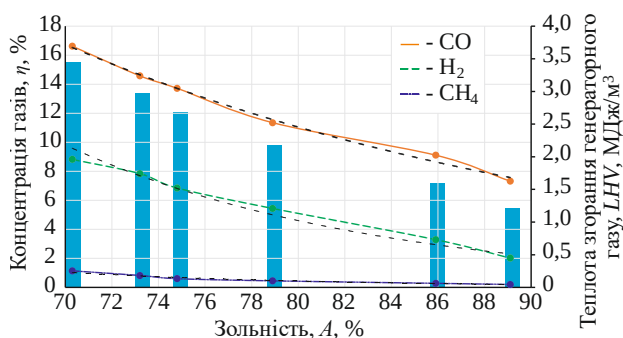


Рис. 5. Результати зміни концентрації горючих газів та теплоти згорання від зольності сировини породного відвалу

Аналіз наведених даних на рис. 5 свідчить, що зі зростанням показників зольності відходів вихід горючих генераторних газів зменшується за експоненціальними залежностями відповідно:

$$-CO \quad \eta_{CO} = \frac{306,4}{\exp(0,04A)}, \%,$$

$$-H_2 \quad \eta_{H_2} = \frac{1959,9}{\exp(0,08A)}, \%,$$

$$-CH_4 \quad \eta_{CH_4} = \frac{471,1}{\exp(0,08A)}, \%.$$

Зміна концентрації горючих газів зумовлена підвищенням частки інертного мінерального складника та відповідним зниженням реакційної здатності сировини в умовах газифікації. Зокрема, в діапазоні зольності 70,3–89,1 % мінімальні значення виходу генераторного газу становлять 0,36–0,98 м³, тоді як максимальні – 0,41–1,13 м³. При цьому склад генераторного газу зазнає суттєвих змін залежно від зольності сировини. За високих значень зольності 85,9–89,1 % газ характеризується низьким вмістом горючих компонентів: концентрація CO становить 7,32–9,12 %, H₂ – 2,02–3,29 %, за наявності CH₄ на рівні 0,2–0,28 %. За таких умов теплота згоряння генераторного газу перебуває в межах 1,21–1,61 МДж/м³.

Зі зменшенням зольності до 73,2–74,8 % спостерігається зростання вмісту горючих компонентів: частка CO підвищується до 13,72–14,58 %, H₂ – до 6,85–7,84 %, а вміст CH₄ зростає до 0,6–0,82 %, що позитивно позначається на теплотворній здатності газу, яка збільшується до 2,69–2,98 МДж/м³.

Подальше зниження зольності до 70,3 % забезпечує формування генераторного газу з максимальним вмістом горючих компонентів: CO – 16,62 %, H₂ – 8,82 %, CH₄ – 1,14 %. За таких умов теплота згоряння газу досягає 3,46 МДж/м³, що свідчить про істотне підвищення енергетичної цінності генераторного газу.

Необхідно відмітити, що зі зменшенням зольності активізуються гетерогенні реакції газифікації вуглецю, зокрема реакції Будуара (C + CO₂ → 2CO) та водяного газу (C + H₂O → CO + H₂), а також зростає роль вторинних перетворень, включно з конверсією оксиду вуглецю з водяною парою (CO + H₂O → CO₂ + H₂). Інтенсифікація цих реакцій забезпечує підвищення концентрації CO та H₂ у складі генераторного газу і зниження частки CO₂, що зумовлює зростання його теплотворної здатності з 1,21 МДж/м³ до 3,46 МДж/м³, що підтверджує доцільність зменшення зольності відходів як одного з ключових чинників інтенсифікації процесу газифікації та підвищення його енергетичної ефективності.

Висновки. Проведений аналіз свідчить про високу перспективність газифікації відходів гірничого виробництва як елемента ресурсоефективної та циркулярної моделі розвитку, оскільки значні обсяги техногенних масивів формують не лише екологічні ризики, а й суттєвий вторинний енергетичний потенціал. Газифікація відходів вуглевидобутку дає змогу ефективно залучати матеріали з високою зольністю та складним органомінеральним складом, що є її ключовою перевагою порівняно з прямим спалюванням,

а утворення генераторного газу, збагаченого CO та H₂, забезпечує можливість його використання як універсального енергоносія та хімічної сировини.

У результаті проведених досліджень установлено, що відходи вуглевидобутку, складовані у відвалах шахти «Великомостівська», характеризуються високими значеннями зольності, які перебувають у межах 70,3–89,1 %, що свідчить про переважання мінерального складника та обмежений, але технологічно значущий уміст вуглецевмісної фракції.

За результатами досліджень установлено, що вміст горючих компонентів генераторного газу CO, H₂ та CH₄ змінюється за експоненційними

залежностями від зольності вуглецевмісної сировини. Зі зростанням зольності їх концентрації зменшуються внаслідок скорочення частки реакційно-активного вуглецю та збільшення інертного мінерального баласту. Виявлені залежності відображають згасання термохімічних реакцій газифікації та можуть бути використані для прогнозування складу й теплотворної здатності генераторного газу.

Вдячність. Представлені результати отримано в межах виконання науково-дослідної роботи ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля» (проект №0123U101757) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. International Energy Agency. Global coal consumption, 2000–2026. 2025. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-coal-consumption-2000-2026>
2. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris : IEA. 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
3. Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD Economic Outlook 2022. Paris: OECD Publishing. 2022. URL: <https://www.oecd.org/economic-outlook/>
4. Bórawski P., Beldycka-Bórawska A., Holden L. Changes in the Polish coal sector economic situation with the background of the European Union energy security and eco-efficiency policy. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 726. <https://doi.org/10.3390/en16020726>
5. European Commission. Coal regions in transition. 2020. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/clean-energy-transition/eu-coal-regions-transition_en
6. Uyanik S., Dogerlioglu Isiksungur O. How realistic are coal phase-out timeline targets for Turkey? *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 4. 1649. <https://doi.org/10.3390/su16041649>
7. Araujo F. S. M. et al. Recycling and reuse of mine tailings: A review. *Geosciences*. 2022. Vol. 12, No. 9. 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
8. Janáková I. Utilisation of mining waste. *Sustainability and Mining Waste Journal*. 2025. Vol. 1, No. 1. P. 35. <https://doi.org/10.3390/2673-4591/116/1/35>
9. Petlovanyi M.V., Medianyuk V.Y. Assessment of coal mine waste dumps development priority. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. No. 4. P. 28–35. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-4/3>
10. Kostenko V., Bohomaz O., Hlushko I., Liashok N., Kostenko T. Use of solid mining waste to improve water retention capacity of loamy soils. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. Vol. 17, No. 4. P. 29–34. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.029>
11. Zubov A., Zubov A., Zubova L. Ecological hazard, typology, morphometry and quantity of waste dumps of coal mines in Ukraine. *Ecological Questions*. 2023. Vol. 34, No. 4. P. 1–19. <https://doi.org/10.12775/EQ.2023.042>
12. Nádudvari Á. et al. Organic minerals in a self-heating coal-waste dump in Upper Silesia, Poland: Structure, formation pathways and environmental issues. *International Journal of Coal Geology*. 2024. Vol. 281. 104403. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104403>
13. Чоботько І. Обґрунтування способів та методів усунення самозаймання відходів гірничого виробництва. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2022. № 1(50). С. 166–171. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2022-1-166-171>
14. Jiao Y. et al. A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 170. P. 1240–1260. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.083>
15. Wang G., Ma L., Liu Y. Characteristics and health impacts of dust pollution in open-pit coal mining areas. *Atmosphere*. 2024. Vol. 15, No 12. 1408. <https://doi.org/10.3390/atmos15121408>
16. Szymankiewicz K. et al. Parameterization of dust emissions from heaps and excavations based on measurement results and mathematical modelling. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 13. 2447. <https://doi.org/10.3390/rs16132447>

17. Makwana J. et al. An analysis of waste/biomass gasification producing hydrogen-rich syngas: A review. *International Journal of Thermofluids*. 2023. Vol. 20. 100492. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100492>
18. Li G. A review of recent advances in biomass-derived porous carbon materials for clean energy and environmental applications. *Porous Materials*. 2025. Vol. 11, No. 4. P. 92. <https://www.mdpi.com/2311-5629/11/4/92>
19. Devi R. et al. Recent advancement in biomass-derived activated carbon for wastewater treatment, energy storage, and gas purification: A review. *Journal of Materials Science*. 2023. Vol. 58, No. 30. P. 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08773-0>
20. Antony Jose S. et al. Promoting a circular economy in mining practices. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 24. 11016. <https://doi.org/10.3390/su162411016>
21. European Commission. A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. 2020. URL: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en
22. Geng Y., Fu J., Sarkis J., Xue B. Towards a national circular economy indicator system in China. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 23, No. 1. P. 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>
23. Li J. et al. Thermochemical conversion of solid waste and coal blends for syngas production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 136. 110412. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110412>
24. Jha S. et al. A review of thermochemical conversion of waste biomass to biofuels. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 17. 6352. <https://doi.org/10.3390/en15176352>
25. Onifade M., Genc B. Spontaneous combustion liability of coal and coal-shale: A review of prediction methods. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2019. Vol. 6, No. 2. P. 151–168. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-0242-9>
26. Nguyen P. M. V. A review of the impact of spontaneous combustion on slope stability in coal mine waste dumps. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 13. 7138. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/13/7138>
27. Izak P. et al. Utilisation of mining waste for production of ceramic tiles *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 7. 3957. <https://doi.org/10.3390/app15073957>
28. Miao H. et al. Effects of Na₂CO₃/Na₂SO₄ on catalytic gasification reactivity and mineral structure of coal gangue. *Energy*. 2022. Vol. 255. 124498. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124498>
29. Lysyi N. et al. Thermodynamic research of coal mining waste gasification processes. *Mining of Mineral Deposits*. 2025. Vol. 19, No. 3. P. 132–143. <https://doi.org/10.33271/mining19.03.132>
30. Dychkovskiy R. et al. Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, No. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93611-3>
31. Wang B. et al. Study on co-pyrolysis of coal and biomass and process simulation optimization. 2023. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1939.v1>
32. Ungureanu N. Municipal solid waste gasification: Technologies, process readiness and integration within circular economy frameworks. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 15. 6704. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/15/6704>
33. Ban Y. et al. The catalytic effect of calcium and potassium on CO₂ gasification of Shengli lignite. *Royal Society Open Science*. 2018. Vol. 5, No. 9. 180717. <https://doi.org/10.1098/rsos.180717>
34. Proto A. R. et al. Energetic characteristics of syngas obtained from gasification of hazelnut prunings. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2016. Vol. 223. P. 835–840. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.288>

REFERENCES:

1. International Energy Agency. (2025). Global coal consumption, 2000-2026. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-coal-consumption-2000-2026>
2. International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023. IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
3. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). OECD economic outlook 2022. OECD Publishing. Retrieved from <https://www.oecd.org/economic-outlook/>
4. Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., & Holden, L. (2023). Changes in the Polish Coal Sector Economic Situation with the Background of the European Union Energy Security and Eco-Efficiency Policy. *Energies*, 16(2), 726. <https://doi.org/10.3390/en16020726>
5. European Commission. (2020). Coal regions in transition. European Commission. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/topics/clean-energy-transition/eu-coal-regions-transition_en

6. Uyanik, S., & Dogerlioglu Isiksungur, O. (2024). How Realistic Are Coal Phase-Out Timeline Targets for Turkey? *Sustainability*, 16(4), 1649. <https://doi.org/10.3390/su16041649>
7. Araujo, F. S. M., et al. (2022). Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review. *Geosciences*, 12(9), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
8. Janáková, I. (2025). Utilisation of Mining Waste. *Sustainability and Mining Waste Journal*, 1(1), 35. <https://doi.org/10.3390/2673-4591/116/1/35>
9. Petlovanyi, M. V., & Mediany, V. Y. (2018). Assessment of coal mine waste dumps development priority. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-4/3>
10. Kostenko, V., Bohomaz, O., Hlushko, I., Liashok, N., & Kostenko, T. (2023). Use of solid mining waste to improve water retention capacity of loamy soils. *Mining of Mineral Deposits*, 17(4), 29–34. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.029>
11. Zubov, A., Zubov, A., & Zubova, L. (2023). Ecological hazard, typology, morphometry and quantity of waste dumps of coal mines in Ukraine. *Ecological Questions*, 34(4). <https://doi.org/10.12775/EQ.2023.042>
12. Nádudvari, Á., Krzykowski, T., Jabłońska, M., Fabiańska, M., Skrzyńska, K., Abramowicz, A., Książek, M., & Ciesielczuk, J. (2024). Organic minerals in a self-heating coal-waste dump in Upper Silesia, Poland: Structure, formation pathways and environmental issues. *International Journal of Coal Geology*, 281, 104403. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104403>
13. Chobotko, I. (2022). Obgruntuvannia sposobiv ta metodiv usunennia samozaimannia vidkhodiv hirnychoho vyrobnytstva [Justification of methods and techniques for the elimination of self-disposal of mining waste]. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 1, 166 – 171. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2022-1-166-171> [in Ukrainian]
14. Jiao, Y., Zhang, C., Su, P., Tang, Y., Huang, Z., & Ma, T. (2023). A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization. *Process Safety and Environmental Protection*, 170, 1240–1260. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.083>
15. G. Wang, L. Ma, Y. Liu (2024). Characteristics and health impacts of dust pollution in open-pit coal mining areas. *Atmosphere*, 15(12), 1408. <https://doi.org/10.3390/atmos15121408>
16. Szymankiewicz, K., Posyniak, M., Markuszewski, P., & Durka, P. (2024). Parameterization of Dust Emissions from Heaps and Excavations Based on Measurement Results and Mathematical Modelling. *Remote Sensing*, 16(13), 2447. <https://doi.org/10.3390/rs16132447>
17. Makwana, J., Dhass, A. D., Ramana, P. V., Sapariya, D., & Patel, D. (2023). An analysis of waste/ biomass gasification producing hydrogen-rich syngas: A review. *International Journal of Thermofluids*, 20, 100492. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100492>
18. Li, G. (2025). A Review of Recent Advances in Biomass-Derived Porous Carbon Materials for Clean Energy and Environmental Applications. *Porous Materials*, 11(4), 92. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2311-5629/11/4/92>
19. Devi, R., Kumar, V., Kumar, S., & Bulla, M. (2023). Recent advancement in biomass-derived activated carbon for wastewater treatment, energy storage, and gas purification: A review. *Journal of Materials Science*, 58(30), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08773-0>
20. Antony Jose, S., Calhoun, J., Renteria, O. B., Mercado, P., Nakajima, S., Hope, C. N., Sotelo, M., & Menezes, P. L. (2024). Promoting a Circular Economy in Mining Practices. *Sustainability*, 16(24), 11016. <https://doi.org/10.3390/su162411016>
21. European Commission. (2020). A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. *Publications Office of the European Union*. Retrieved from https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en
22. Geng, Y., Fu, J., Sarkis, J., & Xue, B. (2012). Towards a national circular economy indicator system in China: An evaluation and critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 216 – 224. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>
23. Li, J., Zhang, X., Yang, W., Blasiak, W., & Wang, X. (2021). Thermochemical conversion of solid waste and coal blends for syngas production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110412. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110412>
24. Jha, S., Nanda, S., Acharya, B., & Dalai, A. K. (2022). A Review of Thermochemical Conversion of Waste Biomass to Biofuels. *Energies*, 15(17), 6352. <https://doi.org/10.3390/en15176352>
25. Onifade, M., & Genc, B. (2019). Spontaneous combustion liability of coal and coal-shale: a review of prediction methods. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(2), 151–168. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-0242-9>

26. Nguyen, P. M. V. (2025). A review of the impact of spontaneous combustion on slope stability in coal mine waste dumps. *Applied Sciences*, 15(13), 7138. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/13/7138>
27. Izak, P., Delihowski, J., Mastalska-Popławska, J., & Stempkowska, A. (2025). Utilisation of Mining Waste for Production of Ceramic Tiles. *Applied Sciences*, 15(7), 3957. <https://doi.org/10.3390/app15073957>
28. Miao, H., Wang, Z., Wang, Z., Sun, H., Li, X., Liu, Z., Dong, L., Zhao, J., Huang, J., & Fang, Y. (2022). Effects of $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{SO}_4$ on catalytic gasification reactivity and mineral structure of coal gangue. *Energy*, 255, 124498. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124498>
29. Lysyi, N., Helesh, A., Popovych, V., Saik, P., & Dmytruk, O. (2025). Thermodynamic research of coal mining waste gasification processes. *Mining of Mineral Deposits*, 19(3), 132–143. <https://doi.org/10.33271/mining19.03.132>
30. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Saik, P., Lozynskiy, V., Sala, D., Hankus, Ł., Magdziarczyk, M., & Smoliński, A. (2025). Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93611-3>
31. Wang, B., Liu, N., Wang, S., Li, X., Li, R., & Wu, Y. (2023). Study on Co-pyrolysis of Coal and Biomass and Process Simulation Optimization. <https://doi.org/10.20944/preprints202307.1939.v1>
32. Ungureanu, N. (2025). Municipal solid waste gasification: Technologies, process readiness and integration within circular economy frameworks. *Sustainability*, 17(15), 6704. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/15/6704>
33. Ban, Y., Wang, Y., Li, N., He, R., Zhi, K., & Liu, Q. (2018). The catalytic effect of calcium and potassium on CO_2 gasification of Shengli lignite: the role of carboxyl. *Royal Society Open Science*, 5(9), 180717. <https://doi.org/10.1098/rsos.180717>
34. Proto, A. R., Longo, L., Gambella, F., Zimbalatti, G., Macrì, G., Gallucci, F., Caruso, L., Salerno, M., & Colantoni, A. (2016). Energetic Characteristics of Syngas Obtained from Gasification of Hazelnut Prunings. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, (223), 835–840. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.288>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 29.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 614.894

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-27>

РОЗРОБКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА ДЛЯ ГІРНИКІВ

Чеберячко Юрій Іванович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-7307-1553

Хома Руслан Євгенійович,

доктор хімічних наук, професор,
професор кафедри аналітичної та токсикологічної хімії
Одеського національного університету імені І. І. Мечнікова
ORCID ID: 0000-0002-5312-6382

Радчук Дмитро Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-8034-541X

Муха Олег Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,
науковий співробітник лабораторії інженерно-технічних досліджень
Дніпропетровського науково-дослідного інституту судових експертиз
ORCID ID: 0000-0002-1311-8708

Шошин Дмитро Вячеславович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0009-4999-4134

Єфіменко Олексій Павлович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0005-8123-7353

Метою роботи є розробка нової конструкції фільтрувального респіратора для гірничих підприємств з урахуванням антропометричних параметрів обличчя працівників з покращеною формою смуги обтюраторії.

Використано метод оптичної тріангуляції для побудови 3D-моделі півмаски респіратора на основі визначення координат ключових антропометричних точок, а також функцію Гаусса радіального вигляду для згладжування та локальної підгонки моделі півмаски до топології обличчя користувача. Використано процес розробки півмаски на основі цифрового зображення обличчя, який складається з формування контурів півмаски за висотою і довжиною обличчя та визначення дизайну смуги обтюраторії.

Розроблено нову конструкцію фільтрувального респіратора з покращеною формою смуги обтюраторії, яка враховує антропометрію обличчя користувача. Вдосконалено метод 3D-моделювання півмаски респіратора шляхом визначення координат ключових антропометричних точок обличчя потенційних користувачів методом оптичної тріангуляції. Запропоновано процес визначення площі прилягання смуги обтюраторії півмаски до обличчя користувача. Встановлено, що зі збільшенням розміру півмаски площа контакту смуги обтюраторії півмаски з обличчям зменшується, що пов'язано зі зміною геометрії самої півмаски. Визначено, що респіратор до 70 % своєї смуги обтюраторії контактує з обличчям людини в ділянці щік.

Наукова новизна полягає в удосконаленні процесу проєктування півмаски фільтрувального респіратора з використанням методу оптичної тріангуляції для побудови півмаски за ключовими антропометричними

точками, а також функцію Гаусса радіального вигляду для локальної підгонки смуги обтюрації півмасок до топологічної структури обличчя користувача.

Практична цінність полягає у розробці процесу визначення площі прилягання смуги обтюрації півмаски до обличчя користувача.

Ключові слова: респіратор, смуга обтюрації, цифрова модель, антропометрія, пневмоконіоз.

Cheberyachko Yuriy, Khoma Ruslan, Radchuk Dmytro, Mukha Oleh, Shoshyn Dmytro, Efimenko Oleksii. Development of a new design filtering respirator for miners

The purpose of the research is to develop a new design of a filtering respirator for conditions of mining enterprises, taking into account the anthropometric parameters of workers' faces and featuring an improved the sealing line.

The optical triangulation method was used to design a 3D model of the respirator face blank based on the determination of the coordinates of key anthropometric points, as well as a Gaussian radial basis function for smoothing and local fitting of the half mask model to the user's facial topology.

A new design of a filtering respirator has been developed, which takes into account the user's facial anthropometry. The 3D modeling method of the respirator sample was improved by determining the coordinates of key anthropometric points of users' faces using the optical triangulation method. A process for determining the contact area of the sample with the user's face was proposed. It was established that as the size of the sample increases, the contact area of the sealing line with the face decreases, which is related to changes in the half mask's geometry.

The scientific novelty lies in improving the respirator design process through the use of the optical triangulation method to design the sample on key anthropometric points as Gaussian radial basis function for local adjustment of the facial topological structure.

The practical value consists in developing a process for determining the contact area of the half mask sealing line with the user's face.

Key words: respirator, sealing line, digital model, anthropometry, pneumoconiosis.

Вступ. Умови праці гірників часто супроводжуються високим рівнем запиленості, що значно перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Це створює серйозні ризики для здоров'я працівників, призводячи, зокрема, до розвитку пневмоконіозу, професійного раку легень, бронхітів та інших захворювань дихальної системи [1]<https://journal-nndipbor.com/index.php/journal/article/download/98/91/>. За даними проведених досліджень, понад половина професійних захворювань гірників мають пилову етіологію, що обумовлює необхідність удосконалення засобів індивідуального захисту органів дихання. Сучасні фільтрувальні респіратори не завжди забезпечують достатній рівень захисту, особливо в умовах високої концентрації пилу, що накопичується в підмасковому просторі [2]https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/24326/1/NVKPI2017-2_14.pdf. Це зумовлено насамперед підсмоктуванням нефільтрованого повітря через нещільності смуги обтюрації між обличчям користувача та лицевою частиною респіратора. Зазначена проблема пов'язана з неможливістю налаштування обтюратора певної моделі респіратора під всі можливі антропометричні параметри обличчя користувачів. Наприклад, у відомого фільтрувального респіратора «Шахтар» (рис. 1), який характеризується значною пиломісткістю, розробники більше уваги звернули на надійну й герметичну фіксацію патронів та зменшення його габаритів і маси [3].



Рис. 1. Загальний вигляд респіратора «Шахтар»: 1 – еластомерна півмаска; 2 – наголовний гарнітур

Звісно, вирішення зазначених задач призвело до покращення комфорту використання респіратора, але не забезпечило підвищення захищеності користувачів. Звідси виникає потреба в розробці нової конструкції фільтрувального респіратора, що дасть змогу підвищити ефективність захисту гірників. Це може бути виконано шляхом розробки нових конструкцій обтюраторів, які максимально відповідатимуть антропометрії обличчя.

Аналіз літературних джерел. Задачу з підвищення ізолювальних властивостей півмасок респіратора намагались активно вирішувати низка фахівців. Зокрема, у роботі [4] досліджено конструкцію півмаски респіратора для покращення щільності прилягання та були запропоновані зміни до каркаса, який може підлаштовуватися до різної антропометрії обличчя, що зменшує втрати герметичності та підвищує

комфорт користувача. Однак цей каркас використовується тільки для одноразових півмасок. Спроба вирішити вищезазначену проблему була запропонована авторами в статті [5]. Так, у роботі було зазначено, що під час вибору фільтрувальних респіраторів з урахуванням умов праці, антропометричних параметрів обличчя користувачів і терміну захисної дії фільтрів особливу увагу звертають саме на забезпечення герметичності півмаски та щільності прилягання до обличчя, що може бути не легким процесом. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати метод термографування [5]. Для кардинального вирішення зазначеної проблеми, зокрема в умовах гірничих підприємств, існує можливість використання моторизованого респіратора. Його особливість полягає в тому, що під маскою створюється позитивний тиск, який унеможливує потрапляння нефільтрованого повітря через щілини [6]. Разом із тим у таких моторизованих респіраторах існують інші задачі, які потребують вирішення. Наприклад, є певна залежність між опором диханню фільтра та розрядом джерела живлення респіратора, що дає можливість прогнозувати термін безпечної експлуатації [7]. Також існує проблема із забезпечення герметичності фланцевих з'єднань між моторовим блоком респіратора та лицевою частиною [8].

Отже, можна зробити висновок, що щільність прилягання півмаски респіратора до обличчя користувача є критичним фактором, що визначає ефективність захисту органів дихання від пилу, аерозолів і токсичних газів. Незважаючи на значний прогрес у розробці фільтрувальних матеріалів, проблема герметичності залишається частково невирішеною, особливо в умовах гірничої промисловості. Це зумовлено антропометричними відмінностями обличчя (форма та розміри обличчя, наявність волоссяного покриву, використання окулярів), що суттєво впливає на герметичність прилягання; відсутністю універсальної конструкції, яка б забезпечувала щільне прилягання для всіх типів обличчя; недостатньою адаптацією ущільнювачів до коливань температури та відносної вологості повітря, що характерно для гірничих умов [9]. Звідси формуються напрями подальших досліджень, що стосуються індивідуалізації конструкції півмаски з використанням 3D-сканування обличчя, упровадження термографічного контролю герметичності, розробки гнучких, адаптивних матеріалів ущільнювачів, які змінюють форму залежно від температури та тиску.

Метою роботи є розробка нової конструкції фільтрувального респіратора для гірничих

підприємств з урахуванням антропометричних параметрів обличчя працівників з покращеною формою смуги обтюраторії.

Методи та методики дослідження. Процес виготовлення будь-якого фільтрувального респіратора складається з декількох кроків (рис. 2) [8].



Рис. 2. Етапи проектування фільтрувальних респіраторів

На першому кроці виконується аналіз умов експлуатації майбутніх респіраторів, що дасть змогу зрозуміти функціональне призначення захисного пристрою, визначитись із класом захисту, підібрати відповідні фільтрувальні та конструктивні матеріали. Другий крок присвячений підготовці до розробки конструкції фільтрувального респіратора та полягає у детальній аналізі антропометричних параметрів майбутніх користувачів для побудови цифрової моделі голови, геометричні розміри якої є основою каркаса лицевої частини. На третьому кроці проводиться розробка 3D-моделі (проектування) лицевої частини, входними параметрами якої є ключові антропометричні точки обличчя. Зазвичай розробляється від трьох до п'яти розмірів півмасок (шляхом згрупування схожих типорозмірів). Наступний крок присвячений вибору фільтрувальних матеріалів і розрахункам за математичними моделями захисних властивостей спроєктованої лицевої частини з внесенням відповідних коректив. Останній крок – це виготовлення макетів та їх тестування в лабораторних умовах на відповідність вимогам стандарту до виробу.

До особливостей аналізу антропометричних параметрів обличчя за допомогою 3D-сканування потрібно віднести поєднання декількох зображень в одне ціле. Це зображення в подальшому обробляється для визначення реальних розмірів (наприклад, можна скористатися методом Active Shape Models або методом об'єднаних моделей), при цьому взаємозв'язок між окремими зображеннями виражається через

зіставлення нормалі l з певною площиною, яка задається параметрами камери сканера і проєктора (рис. 3) через рівняння (1).

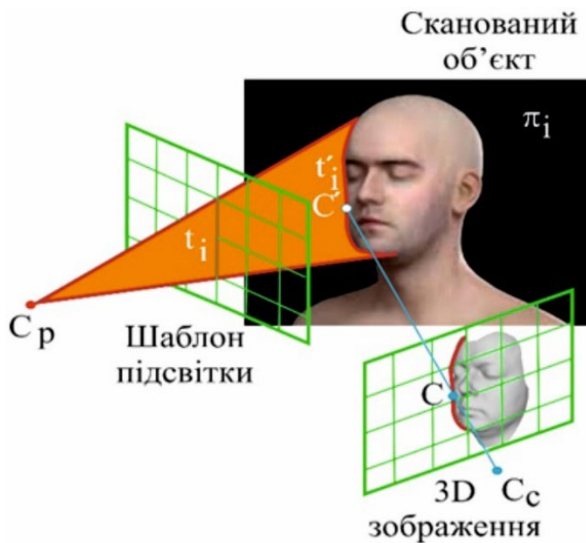


Рис. 3. Схема побудови моделі оптичної триангуляції: C_p і C_c – оптичні центри проєктора та камери

$$[0, 1 - d(i)] \times P_p [x, y, z]^T = 0 \quad (1)$$

де P_p – проєкційна матриця проєктора; (x, y, z) – координати точки, які належать нормалі.

Для побудови моделі голови використовують відповідне програмне середовище, у якому за допомогою функції 3D-реконструкції визначають координати антропометричних точок як (2):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \text{reconstruct}(u, v, i, k, P_c, P_p), \quad (2)$$

де P_c, P_p – проєкційні матриці камери та проєктора, що визначаються у процесі калібрування; u, v – координати точок, що визначаються алгоритмами аналізу цифрового зображення й ідентифікацією шаблону підсвічування, які за масивом кольорових пікселів I дають можливість отримати безліч $\{u_k = \{(u_k^i, v_k^i)\}\}$ ідентифікованих точок шаблону; i – індекс прямої шаблону; k – коефіцієнт коригування між матрицями даних відсканованих зображень.

У подальшому шляхом багатоетапної оцінки пропорцій голови, представлених хмарою точок (рис. 2), з використанням зваженої функції Гаусса радіального вигляду та локальної підгонки з урахуванням топологічної структури будується цифрове зображення. Так, на першому етапі задаються координатами $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, що являють собою набір векторів $d_i = (d_1^i, d_2^i, \dots, d_n^i)$, елементами яких є індекси вершин моделі. Вектор задає ламану лінію, яка

описує одну характерну рису обличчя, контур носа, губ або обличчя взагалі. Розміри ліній задаються за допомогою антропометричних точок, визначених на обличчі. Лінії утворюють параболічний сплайн, що безперервно задає форму перетину (рис. 4).

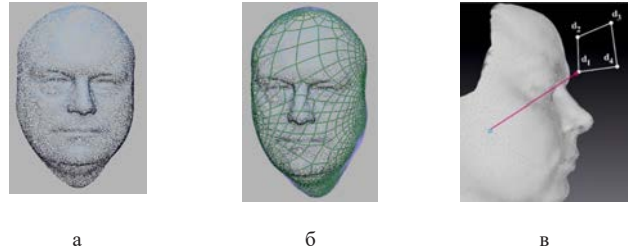


Рис. 4. Етапи перетворення сканованого зображення голови з хмари точок (а) з нанесеними сплайнами (б) у цифровий вигляд з розміткою і координатами (в)

Кожний сплайн рівномірно розбивається додатковими точками для утворення рівної кількості ділянок на всіх горизонтальних перетинах. Додаткові точки поєднуються між собою, утворюючи сітку чотирикутників (рис. 4 б). Для підгонки розмітки до антропометричних точок користуємося трьома типами перетворень: ідентичним, зміщенням відносно встановлених точок та аффіно відносно вже розміщених точок.

На цьому етапі виникає потреба в побудові типорозміру облич. Для цього використовуємо відомий метод компонент, який базується на десяти розмірах обличчя, що становлять основу для розрахунку комплексних показників – так званих компонент PC1 і PC2.

PC1 (перший компонент) = $0,343264 \cdot$ (ширина голови у лоба) + $0,426498 \cdot$ (ширина лиця) + $0,372717 \cdot$ (ширина лиця за кутами нижньої щелепи) + $0,329648 \cdot$ (довжина лиця) + $0,363474 \cdot$ (відстань між бровами) + $0,372241 \cdot$ (ширина голови) + $0,113578 \cdot$ (висота носа) + $0,301125 \cdot$ (ширина носа біля рота) + $0,202311 \cdot$ (ширина перенісся) + $0,193650 \cdot$ (довжина носа).

PC2 (другий компонент) = $-0,152951 \cdot$ (ширина голови у лоба) – $0,039087 \cdot$ (ширина лиця) – $0,093279 \cdot$ (ширина лиця за кутами нижньої щелепи або глибина обличчя) + $0,359799 \cdot$ (довжина лиця) – $0,173099 \cdot$ (відстань між бровами) + $0,013306 \cdot$ (ширина голови) + $0,551842 \cdot$ (висота носа) – $0,210833 \cdot$ (ширина носа біля рота).

За цими компонентами всі типи обличчя працівників поділяють на п'ять основних категорій: малі, короткі – широкі, середні, довгі й високі, великі (рис. 5), за якими в подальшому формують вимоги до конструкції ЗІЗОД.

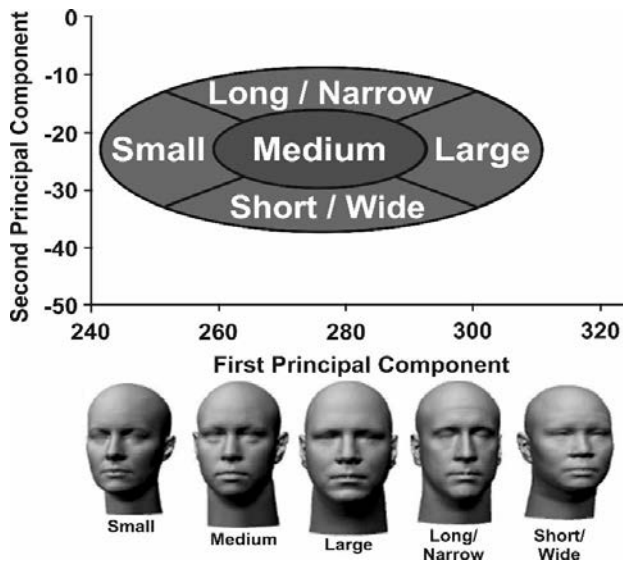


Рис. 5. Розподіл розмірів обличч користувачів на 5 категорій за компонентами PC1 і PC2

Вирішення наступної задачі – це перетворення цифрового зображення обличчя, заданого в тривимірній системі координат, у параметри індивідуальної півмаски – представлено у формі алгоритму (3):

$$F_0 = \Pi(F_n), \quad (3)$$

де F_0 – форма обличчя, що має певні початкові значення координат x, y, z для точок 1, 2, 3, ..., n , що визначають її параметри в тривимірній системі координат; F_n – форма півмаски, обумовлена зміною початкових значень координат x, y, z ; Π – знак перетворення внаслідок процесу створення півмаски.

Процес розробки півмаски на основі цифрового зображення обличчя складається з декількох кроків: формування контурів півмаски за висотою і довжиною обличчя та визначення дизайну смуги обтюрації (рис. 6 та 7).

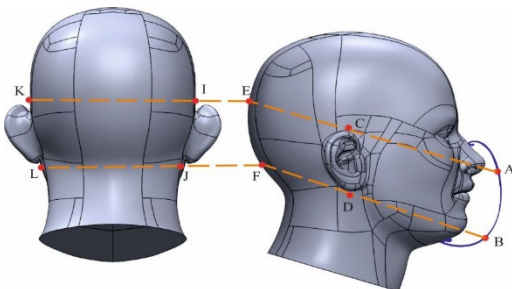


Рис. 6. Розробка дизайну смуги обтюрації: визначення нижньої точки координат півмаски на підборідді (а); визначення верхньої точки координат півмаски на підборідді та формування контуру півмаски (б); визначення ширини півмаски та дизайну обтюратора (в)

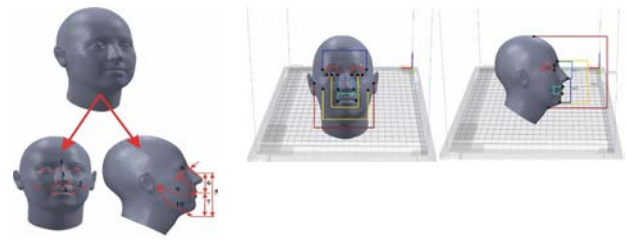


Рис. 7. Визначення координат ключових точок

Останній крок – це побудова форми півмаски за відомою поверхнею обтюратора. Цей етап виконується за допомогою сплайнів, якими поступово формується каркас і з'єднуються елементи його поверхні (рис. 8).

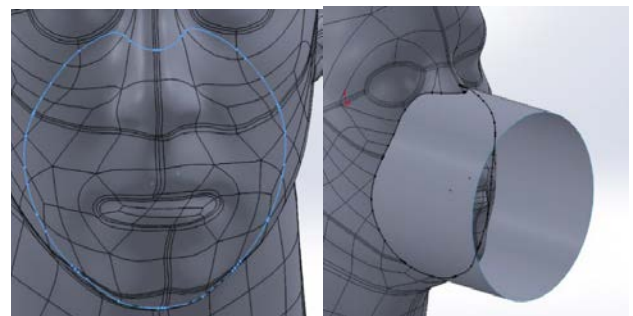


Рис. 8. Встановлена координатна лінія смуги обтюрації

Після визначення форми смуги обтюрації переходимо до побудови півмаски. Встановлені геометричні розміри можуть накладати додаткові умови формування базових ескізів елементів для майбутнього каркаса. Для створення формованої півмаски розкриємо отриману смугу на дві частини – перенесімо її підборіддя, з урахуванням динамічної прив'язки між ними.

Загальна висота корпусу для цього обличчя дорівнюватиме 108 мм, тобто відповідатиме розміру АБ, ширина обличчя – 110 мм, тобто відповідатиме розміру ВГ, глибина маски визначається відповідно до розміру ДЖ. Формуємо каркас середньої частини півмаски. Головною умовою його створення є необхідність гнучкості в точках А та Б. Тут існує декілька варіантів формовки (трапецієвидний, квадратний, напівкруглий, трикутний та овальний). Загальні варіанти формовки суттєво впливають на площу фільтрувальної поверхні й обмеження поля зору. Вибираємо метод формування квадрат, оскільки він дає змогу досить легко визначити кут згину для формування каркаса 90 градусів. Для визначення прилягання потрібно врахувати радіус згину; пропонуємо вибирати в діапазоні від 3–5 мм (оскільки це впливатиме на кут згину верхньої і нижньої частини каркаса). У такому

випадку для визначення розвертки каркаса потрібно провести додавання АБ + ДЖ + ДЖ, але оскільки нижню частину роблять більшою, а верхню меншою, то пропонуємо проводити розрахунок висоти верхньої частини на 16 % менше за верхню. У такому випадку формула висоти матиме вигляд:

$$B = AB + DJ + 0,84 DJ + 2 D,$$

де Д – величина деформуючого радіуса, мм.

Визначення ширини залежатиме від ВГ, але оскільки на нього впливають лінії згину, потрібно чітко обмежити умови розрахунку, ось, наприклад, у нашому випадку формула висоти матиме вигляд:

$$R = BG + 2 D.$$

Інколи в конструкціях деформуючий радіус може бути різним, тому в такому випадку пропонуємо попарно їх додавати.

Для спрощення розрахунку пропонуємо прийняти, що лицева частина маски є симетричною, і тим самим поділити її навпіл, промодельовувати згин каркаса без отворів як суцільної моделі, починаючи з ескізу та завершуючи згинами.

Останній крок – це поєднання лицевої частини маски з 3D-моделями голів, які побудовані за даними параметричних таблиць із метою формування певного типоряду півмасок, що передбачає підгонку півмаски до обличчя з подальшим визначенням ширини площі прилягання, яка необхідна для попередньої оцінки коефіцієнта захисту фільтрувальної півмаски. Основні кроки такі (рис. 9):

- поєднання 3D-моделей голів користувачів за параметричною таблицею з півмаскою;
- визначення розмірів зон обличчя, які характеризуються однаковою пружністю ділянок;
- встановлення параметрів сітки для деталізації областей дослідження, яка наноситься на моделі обличчя та півмаску;
- розрахунок площі контакту між півмаскою і обличчям для подальшої оцінки.

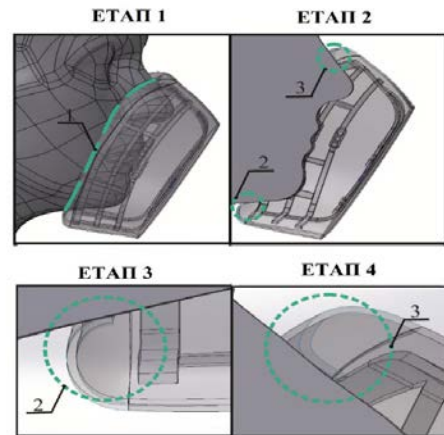


Рис. 9. Етапи поєднання півмаски із цифровою моделлю голови для оцінки її щільності прилягання до обличчя

Результати. Для підвищення ізолювальних властивостей базової моделі респіратора «Шахтар» було визначено антропометричні параметри облич потенційних користувачів віком від 25 до 30 років на вугільній шахті. Результати наведені в табл. 1.

На основі вищезазначених даних побудовані цифрові моделі голів, які наведені на рис. 10. Для кожного типу цифрової моделі голови були розраховані площі прилягання півмаски до обличчя.

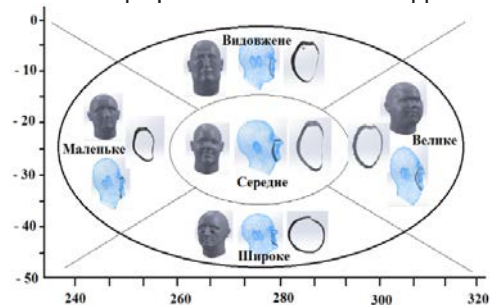


Рис. 10. Вигляд цифрових моделей голів потенційних користувачів із рекомендованими площами прилягання півмаски до обличчя

Таблиця 1

Результати вимірів розмірів обличчя (мм) за віком від 25 до 30 років

Розмір	Чоловіки (35)	Жінки (15)	Усього (50)
GONI	124,2 ± 9,1	118,1 ± 9,1	123,4 ± 10,1
ZYGO	141,3 ± 8,9	131,3 ± 6,0	139,5 ± 8,9
NOSEBRTH	29,7 ± 1,9	27,6 ± 3,3	28,0 ± 3,6
LIPLGTHH	47,4 ± 3,7	45,0 ± 3,7	46,7 ± 4,8
MENSELL	121,1 ± 8,4	117,2 ± 5,8	119,8 ± 7,8
NOSEPRH	45,3 ± 4,5	41,2 ± 3,0	43,7 ± 5,0
MSNL	21,1 ± 2,7	19,4 ± 2,2	20,3 ± 2,6

На основі побудованих цифрових моделей голів у подальшому був розроблений загальний дизайн лицевої частини півмаски (рис. 11).

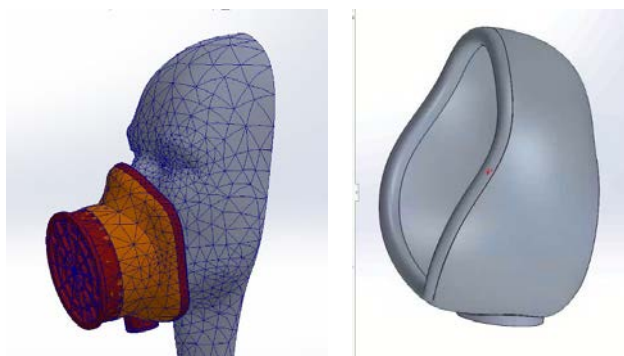


Рис. 11. Загальний дизайн півмаски для респіратору «Шахтар»

Для кожної моделі півмаски, яка відповідає цифровим розмірам, були розраховані відповідні розміри ширини, довжини та глибини лицевої частини півмаски, які дадуть змогу забезпечити відповідну площу смуги обтюрації. Для визначення параметрів лицевої частини додатково спиралися на дані таблиці 1, а саме для моделювання ширини – на параметр ZYGO, висоти – на параметр MENSELL, глибини – на параметр NOSEPRH. Результати наведені в табл. 2.

Загальний вигляд цифрової моделі респіратору «Шахтар» наведено на рисунку 12.



Рис. 12. Запропонована модель респіратору «Шахтар»

Результати розрахунку площі смуги обтюрації для півмаски, зіставленою з різними моделями голів, наведені в таблиці 3.

Результати, наведені в таблиці 3, демонструють залежність ефективності прилягання півмаски до обличчя користувача від її геометричних параметрів. Зі зменшенням розміру півмаски (від варіанта 1 до 5) спостерігається чітка тенденція до зменшення загальної площі контакту між смугою обтюрації та обличчям – від 57,2 см у варіанті 1 до 31,4 см² у варіанті 5. Аналогічно зменшується і середня ширина смуги обтюрації – з 0,94 до 0,35 см.

Найбільший внесок у площу контакту забезпечують щоки (права та ліва), які в сукупності формують понад 70 % загальної площі прилягання.

Наприклад, у варіанті 1 площа контакту з правою та лівою щоками становить 42,2 см², що свідчить про їх ключову роль у забезпеченні герметичності. Водночас площа контакту в зонах перенісся та підборіддя є значно меншою, однак саме ці ділянки є критичними з погляду потенційного підсмоктування нефільтрованого повітря.

Аналіз також виявив певну асиметрію між правою та лівою щоками, що може бути зумовлено як анатомічними особливостями обличчя, так і похибками під час 3D-сканування. Це підкреслює важливість індивідуального підходу до проектування півмасок.

Зменшення площі контакту у варіантах 4 та 5 свідчить про потенційне зниження

Таблиця 2
Основні геометричні розміри лицевої частини півмаски

Варіанти	Розміри лицевої частини півмаски		
	Ширина, мм	Довжина, мм	Глибина, мм
1	131	112	44
2	135	116	46
3	140	120	49
4	144	124	51
5	148	128	53

Таблиця 3
Результати розрахунку площі смуги обтюрації для півмаски, зіставленої з різними моделями голів

Варіанти півмасок	Площа обтюратора відповідно до зон обличчя, см ²				Загальна площа контакту, см ²	Середня ширина смуги, обтюратора см
	перенісся	права щока	ліва щока	підборіддя		
1	4,2	21,3	20,9	10,8	57,2	0,94
2	4,1	20,1	18,3	9,8	52,8	0,92
3	3,2	16,3	14,8	9,3	44,1	0,83
4	1,3	10,2	12,8	7,3	31,6	0,36
5	1,3	10,3	12,3	7,5	31,4	0,35

герметичності для користувачів з меншими розмірами обличчя. Це обґрунтовує потребу у використанні адаптивних ущільнювачів або додаткових засобів підгонки для забезпечення належного рівня захисту.

Таким чином, результати аналізу підтверджують доцільність розробки типоряду півмасок, що враховують морфологічне різноманіття обличчя користувачів. Особливу увагу слід приділяти оптимізації форми смуги обтюрації в зонах перенісся та підборіддя, а також забезпеченню рівномірного розподілу тиску по периметру півмаски.

Дискусія. Побудовані цифрові моделі голів дали можливість візуалізувати зони потенційного прилягання й оптимізувати геометрію обтюратора. Аналіз розрахованих площ обтюрації показав, що зі збільшенням розміру півмаски площа контакту зменшується (від 57,2 до 31,4 см²), що зумовлено пропорційним зростанням габаритів обличчя та зміною радіусів кривизни в ділянках перенісся, щік і підборіддя. Отримані нами дані підтверджуються результатами роботи [10], у якій автори досліджували методи визначення площі контакту між лицевою частиною та муляжем голови, розглядалися муляжі голови п'яти розмірів. У підсумку було проведено порівняння експериментальних даних та результатів моделювання.

Можна зауважити, що існуючі моделі фільтрувальних респіраторів не забезпечують достатньої герметичності через суттєві відмінності антропометричних параметрів обличчя користувачів [11]. Проведені вимірювання обличчя 50 працівників гірничих підприємств показали значну варіацію параметрів ширини, висоти та глибини голови, зокрема показників ZYGO (міжвилична ширина), MENSELL (висота обличчя) та NOSEPRH (проекція носа), які безпосередньо впливають на якість прилягання півмаски. Різниця між крайніми значеннями ширини обличчя (ZYGO) перевищує 17 %, що підтверджує неможливість забезпечення щільного прилягання однією уніфікованою моделлю респіатора. Це обґрунтовує потребу у створення типоряду півмасок із п'яти розмірів, які охоплюють основні морфологічні групи обличчя користувачів.

Ефективність герметизації респіатора визначається не тільки загальними розмірами півмаски, а й формою її поверхні, яка має враховувати локальну пружність тканин обличчя та рівномірний розподіл тиску по периметру смуги обтюрації. У роботі [12] автори отримали подібні до наших висновки, що щільність прилягання та тиск, що створює лицева частина на

обличчя, це є критичним параметром захисної ефективності респіатора.

Використання 3D-моделювання дало змогу створити анатомічно адаптовану конструкцію півмаски респіатора «Шахтар», що враховує індивідуальні антропометричні параметри користувачів. Запропонований підхід дає можливість формувати лицеві частини з урахуванням реальної геометрії обличчя; зменшити ризик підсмоктування нефільтрованого повітря; оптимізувати ергономіку та комфорт під час тривалого використання; підвищити коефіцієнт захисту завдяки більш рівномірному розподілу контактного тиску.

Таким чином, 3D-аналітичний підхід до проектування респіраторів може стати ефективним інструментом для індивідуалізації засобів захисту органів дихання, особливо в умовах гірничої промисловості, де антропометричне різноманіття користувачів є суттєвим чинником впливу на захисні властивості ЗІЗОД.

Більш покращений підхід застосовували автори в роботі [13], вони застосовували метод на основі машинного навчання для проектування 3D-дизайну респіатора. Параметрична модель 3D-людського обличчя була побудована з антропометричної бази даних, що складається з 495 моделей облич. Кореляцію між параметрами було оцінено за допомогою аналізу головних компонентів та лінійної регресії. Використовуючи ці значення параметрів як вхідні дані, параметрична модель генерує 3D-сітку людського обличчя, які слугують орієнтиром для побудови індивідуальної моделі респіатора. Отже, було проведено серію експериментів з 10-кратною перехресною перевіркою, щоб перевірити ефективність запропонованого методу.

На жаль, отримані нами теоретичні результати, проєктовані шляхом комп'ютерного моделювання, не були перевірені в натурному вигляді, тому підтвердження даних розрахунків є актуальним для майбутніх досліджень.

Висновки

1. Розроблено нову конструкцію фільтрувального респіатора з покращеною формою смуги обтюрації, яка враховує антропометрію обличчя користувача.

2. Вдосконалено процес 3D-моделювання півмаски респіатора за рахунок використання методу оптичної тріангуляції для побудови півмаски респіатора за ключовими антропометричними точками, а також функції Гаусса радіального вигляду для локальної підгонки смуги обтюрації півмасок до топологічної структури обличчя користувача.

3. Запропоновано процес визначення площі прилягання смуги обтюраторів півмаски до обличчя користувача, що дало змогу встановити: зі збільшенням розміру півмаски площа контакту смуги обтюраторів півмаски з обличчям зменшується, що пов'язано зі зміною геометрії самої півмаски.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Левченко О. Г., Полукаров Ю. О., Безушко О. М., Гончарова О. М. Порівняльна гігієнічна оцінка магнітних полів при різних способах контактного зварювання. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2024. № 40 (1–2). С. 27–36. <https://doi.org/10.36804/ndpibop.40-1-2.2024.27-36>.
2. Чеберячко С. І., Фрундін В. Ю., Чеберячко Ю. І., Радчук Д. І. Дослідження ефективності конструкцій фільтрувальних коробок. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2017. № 2. С. 114–118. <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.2.99551>.
3. Чеберячко С. І., Чеберячко Ю. І., Яворська О. О., Книш І. М. Проблеми перевірки захисних властивостей фільтрувальних респіраторів. *Збірник наукових праць НГУ*. 2018. № 55. С. 384–391.
4. Bazaluk O., Cheberiachko S., Cheberiachko Y., Deryugin O., Lozynskyi V., Knysh I., Saik P., Naumov M. Development of a dust respirator by improving the half mask frame design. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18 (10). 5482. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105482>.
5. Чеберячко С., Дерюгін О., Мірненко В., Бородіна Н. Вибір ефективних фільтрувальних респіраторів. Проблеми і можливості. *Social development and Security*. 2020. № 10 (4). С. 23–41. <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.4.3>.
6. Cheberiachko S. I., Slavinskyi D. V., Cheberiachko Yu. I., Deryugin O. V. Mathematical model of air flow movement in a motorized filter respirator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 3. P. 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/097>.
7. Strickland K. T., Bergman M. S., Xu S., Zhuang Z. A manikin-based assessment of loose-fitting powered air-purifying respirator performance at variable flow rates and work rates. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2023. Vol. 20 (7). P. 279–288. <https://doi.org/10.1080/15459624.2023.2205481>.
8. Litot O., Manko T. Study of the Influence of Surface Roughness of Carbon Fiber Reinforced Plastics on the Sealability of Disconnectable Joints in Rocket and Space Technology. *Challenges and Issues of Modern Science*. 2023. Vol. 1. P. 263–265. URL: <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/51>.
9. Edirisooriya M., Haas E. Examining the Roles of Training, Fit Testing, and Safety Climate on User Confidence in Respiratory Protection: A Case Example with Reusable Respirators in Health Delivery Settings. *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (17). 12822. <https://doi.org/10.3390/su151712822>.
10. Lei Z., Yang J. Contact Area Determination between a N95 Filtering Facepiece Respirator and a Headform. In: Duffy, V.G. (eds) Digital Human Modeling. ICDHM 2011. *Lecture Notes in Computer Science*. 2011. Vol. 6777. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21799-9_13.
11. Yu M., Griffin L., Durfee W., Arnold S. Face anthropometry for filtering facepiece respirators: analysis of the association between facial dimensions and respirator fit. *Annals of Work Exposures and Health*. 2024. Vol. 68, Issue 3. P. 312–324. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxae005>.
12. Xu M., Lee P., Collins D. The critical importance of mask seals on respirator performance: An analytical and simulation approach. *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16 (2). e0246720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246720>.
13. Chu C. H., Huang S. H., Yang C. K., Tseng C. Y. Design customization of respiratory mask based on 3D face anthropometric data. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2015. Vol. 16. P. 487–494. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0066-5>.

REFERENCES:

1. Levchenko, O., Polukarov, Y., Bezushko, O., & Goncharova, O. (2024). Porivnialna hiiienichna otsinka mahnitnykh poliv pry riznykh sposobakh kontaktnoho zvariuvannia [Program and analytical complex of the industrial safety and health analysis system]. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini – Labour Protection Problems in Ukraine*, 40 (1–2), 27–36. <https://doi.org/10.36804/ndpibop.40-1-2.2024.27-36> [in Ukrainian].
2. Cheberiachko, S., Frundin, V., Cheberiachko, Yu., & Radchuk, D. (2017). Doslidzhennia efektyvnosti konstruksii filtruvalnykh korobok [Research into the effectiveness of filter box designs]. *Naukovi visti NTUU "KPI" – KPI Science News*, 2, 114–118. <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.2.99551> [in Ukrainian].
3. Cheberiachko, S., Cheberiachko, Yu., Yavorska, O., & Knysh, I. (2018). Problemy perevirky zakhysnykh vlastyvostei filtruvalnykh respiratoriv [Problems while testing protective properties of filtering respirators]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU – The Collection of Research Papers of the National Mining University*, 55, 384–391 [in Ukrainian].

4. Bazaluk, O., Cheberiachko, S., Cheberiachko, Y., Deryugin, O., Lozynskyi, V., Knysh, I., Saik, P., & Naumov, M. (2021). Development of a Dust Respirator by Improving the Half Mask Frame Design. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (10), 5482. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105482>.
5. Cheberiachko, S., Deryugin O., Mirnenko, V., & Borodina, N. (2020). Vybir efektyvnykh filtruvalnykh respiratoriv. Problemy i mozhyvosti [Selection of effective filter respirators. Challenges and opportunities]. *Social Development and Security*, 10 (4), 23–41. <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.4.3> [in Ukrainian].
6. Cheberiachko, S., Slavinskyi, D., Cheberiachko, Yu., & Deryugin, O. (2023). Mathematical model of air flow movement in a motorized filter respirator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/097>.
7. Strickland, K., Bergman, M., Xu, S., & Zhuang, Z. (2023). A manikin-based assessment of loose-fitting powered air-purifying respirator performance at variable flow rates and work rates. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 20 (7), 279–288. <https://doi.org/10.1080/15459624.2023.2205481>.
8. Litot, O., & Manko, T. (2023). Study of the Influence of Surface Roughness of Carbon Fiber Reinforced Plastics on the Sealability of Disconnectable Joints in Rocket and Space Technology. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 263–265. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/51>.
9. Edirisooriya, M., & Haas, E. (2023). Examining the Roles of Training, Fit Testing, and Safety Climate on User Confidence in Respiratory Protection: A Case Example with Reusable Respirators in Health Delivery Settings. *Sustainability*, 15 (17), 12822. <https://doi.org/10.3390/su151712822>.
10. Lei, Z., & Yang, J. (2011). Contact Area Determination between a N95 Filtering Facepiece Respirator and a Headform. In: Duffy, V.G. (eds) Digital Human Modeling. ICDHM 2011. *Lecture Notes in Computer Science*, 6777. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21799-9_13.
11. Yu, M., Griffin, L., Durfee, W., & Arnold, S. (2024). Face anthropometry for filtering facepiece respirators: analysis of the association between facial dimensions and respirator fit. *Annals of Work Exposures and Health*, 68 (3), 312–324. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxae005>.
12. Xu, M., Lee, P., & Collins, D. (2021). The critical importance of mask seals on respirator performance: An analytical and simulation approach. *PLoS ONE*, 16 (2), e0246720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246720>.
13. Chu, C. H., Huang, S. H., Yang, C. K., & Tseng, C. Y. (2015). Design customization of respiratory mask based on 3D face anthropometric data. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 16, 487–494. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0066-5>.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 04.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 331.45:004.8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-28>ТРАНСФОРМАЦІЯ СТРАТЕГІЙ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ В СУОП:
ВІД РЕАКТИВНОГО КОНТРОЛЮ ДО ПРОАКТИВНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ**Будін Євген Іванович,**аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0009-0005-5950-585X**Лапшин Олександр Олександрович,**доктор технічних наук,
професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0001-8844-6354

У статті проведено системний аналіз еволюції стратегій управління ризиками в сучасних системах управління охороною праці (далі – СУОП). Висвітлено актуальну проблему стагнації показників виробничого травматизму, спричинену вичерпанням ефективності традиційних реактивних підходів, що базуються на ретроспективному аналізі подій та лінійній теорії «доміно». Досліджено методологічні обмеження існуючих метрик ефективності, зокрема «відстаючих показників», які часто не здатні відобразити складні нелінійні причинно-наслідкові зв'язки у динамічних соціотехнічних системах.

На основі критичного аналізу останніх наукових публікацій (2016–2025 рр.) обґрунтовано нагальну необхідність переходу до проактивної стратегії управління ризиками (Safety-II), що фокусується на забезпеченні резильєнтності та адаптивності системи. Доведено, що в умовах зростаючої складності виробничих процесів та впливу дестабілізуючих факторів системних криз (хронічний стрес, накопичена втома, змінні умови середовища, не здоровий психологічний мікроклімат в колективі працівників) критичним фактором безпеки стає рівень ситуаційної обізнаності фахівців СУОП.

Запропоновано новітній концептуальний підхід до використання предиктивних моделей штучного інтелекту, зокрема ансамблевих методів машинного навчання, для інтеграції та виявлення ієрархії впливу різномірних організаційно-психологічних факторів ризику. Розглянуто архітектуру «Людина – штучний інтелект» за принципом «предиктор-коректор», де алгоритми забезпечують точне прогнозування ризиків (рівень проєкції ситуаційної обізнаності), а фахівець здійснює верифікацію та прийняття управлінських рішень. Такий синергетичний підхід дозволяє нівелювати когнітивні обмеження операторів, подолати проблему інформаційного перевантаження та суттєво підвищити ефективність попередження інцидентів на виробничому рівні.

Ключові слова: система управління охороною праці, проактивна стратегія, ситуаційна обізнаність, штучний інтелект, оцінка ризиків.

Budin Yevhen, Lapshyn Oleksandr. Transforming risk management strategies in occupational health and safety management systems: from reactive control to proactive AI prediction

The article provides a systematic analysis of the evolution of risk management strategies in modern occupational health and safety management systems (hereinafter referred to as OHSMS). It highlights the pressing issue of stagnation in occupational injury rates caused by the exhaustion of traditional reactive approaches based on retrospective analysis of events and linear domino theory. It examines the methodological limitations of existing performance metrics, in particular "lagging indicators," which are often unable to reflect complex nonlinear cause-and-effect relationships in dynamic socio-technical systems.

Based on a critical analysis of recent scientific publications (2016–2025), the urgent need to transition to a proactive risk management strategy (Safety-II) focused on ensuring system resilience and adaptability is justified. It has been proven that in conditions of increasing complexity of production processes and the influence of destabilizing factors of systemic crises (chronic stress, accumulated fatigue, changing environmental conditions, unhealthy psychological microclimate in the team of employees), the level of situational awareness of OHSMS specialists becomes a critical safety factor.

A novel conceptual approach to the use of predictive artificial intelligence models, in particular ensemble machine learning methods (Random Forest), for the integration and identification of the hierarchy of influence of heterogeneous

organizational and psychological risk factors is proposed. The architecture of "Human – Artificial Intelligence" is considered according to the "predictor-corrector" principle, where algorithms provide accurate risk prediction (level of situational awareness projection), and a specialist performs verification and makes management decisions. This synergistic approach allows for the mitigation of operators' cognitive limitations, overcoming the problem of information overload, and significantly improving the effectiveness of incident prevention at the production level.

Key words: occupational safety management system, proactive strategy, situational awareness, artificial intelligence, risk assessment.

Вступ. Сучасний розвиток промислових систем характеризується парадоксальною тенденцією: незважаючи на широке впровадження стандартизованих систем управління охороною праці (СУОП) та посилення нормативного регулювання, темпи зниження виробничого травматизму у багатьох галузях уповільнилися, досягнувши ефекту «плато» [4]. Традиційні підходи до безпеки, що сформувалися у XX столітті, переважно спираються на ретроспективний аналіз інцидентів та пошук винних, що відповідає реактивній парадигмі. Однак в умовах динамічного змінного середовища та зростання впливу психосоціальних факторів (стрес, втома) ці методи виявляються недостатніми. Також в умовах інтеграції українських підприємств до європейських стандартів безпеки праці особливого значення набуває перехід від реактивних методів управління до проактивних підходів, які базуються на прогнозуванні ризиків травматизму та професійної захворюваності. Прогнозні методи дозволяють не лише своєчасно виявляти ймовірні тенденції до зростання впливу небезпек на працівників, але й науково обґрунтовувати необхідність впровадження дієвих профілактичних заходів.

Це сприяє підвищенню ефективності розподілу ресурсів, оптимізації фінансування заходів безпеки та зниженню ймовірності виникнення нещасних випадків [7].

Критичний аналіз праць у сфері інженерії резильєнтності [1, 6] дозволяє виявити суттєву методологічну прогалину в існуючих підходах (рис. 1).

Традиційні методи оцінки ризиків (Safety-I) фокусуються на аналізі "чисельника" (кількості інцидентів), ігноруючи "знаменник" (загальну кількість успішних повсякденних операцій). Як зазначає Е. Холлнагель, такий підхід породжує "помилку вцілілого": система навчається виключно на рідкісних випадках збоїв, залишаючи поза увагою адаптивні механізми, завдяки яким працівники успішно компенсують недоліки системи в 99% випадків. Існуюча література недостатньо висвітлює інструменти оцифрування цих успішних патернів, що і зумовлює необхідність залучення технологічних алгоритмів для аналізу "нормальної роботи", а не лише аварій.

Вивчення новітніх наукових джерел дозволяє виділити три ключові вектори у дослідженнях безпеки праці, а саме:



Рис. 1. Концептуальна модель зміни фокусу управління ризиками: від реактивного зменшення кількості інцидентів (чисельник) до проактивного аналізу предикторів успішної роботи (знаменник)

- еволюція лінійних та індикаторних моделей;
- системне мислення та моделювання;
- спроби цифровізації та ML-моделювання.

Кожен з цих трьох векторів має певні методологічні обмеження.

Незважаючи на спроби модернізації класичних теорій «доміно» [1], вони залишаються сфокусованими на лінійних причинно-наслідкових зв'язках, що не дозволяє врахувати стохастичну природу аварій у складних соціотехнічних системах. Роботи, присвячені проактивним показникам, зокрема методу Elmeri [8] та системам індикаторів у гірничодобувній галузі [2], роблять важливий крок у бік превенції. Проте існує проблема валідності та узгодженості цих метрик: більшість з них є «показниками діяльності» (compliance), а не реального стану безпеки, і часто спираються на суб'єктивні спостереження, а не на об'єктивні дані реального часу.

Дослідники [9] та [10] переконливо доводять переваги системних моделей (STAM, FRAM) над лінійними. Вони стверджують, що аварії є результатом неконтрольованих взаємодій компонентів системи, а не просто помилок операторів. Однак, суттєвим недоліком цих теоретичних побудов є складність їхньої практичної імплементації: вони ідеальні для ретроспективного аналізу (розслідування вже сталих аварій), але важко піддаються алгоритмізації для оперативного прогнозування в режимі online.

Найбільш близькими до тематики даного дослідження є новітні праці [3; 4], які пропонують використовувати машинне навчання для аналізу промислових інцидентів та ідентифікації критичних факторів. Проте, навіть ці передові дослідження залишаються переважно в парадигмі Safety-I: вони навчають моделі передбачати тяжкість травм або фактори небезпеки. Критична прогалина, яку виявлено в проаналізованій літературі, полягає у відсутності моделей, які б використовували технологічні алгоритми не лише для пошуку дефектів, але й для аналізу «нормальної успішної роботи», а також інтегрували б динамічні психосоціальні предиктори, які стають критичними в умовах нестабільності.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю наукового обґрунтування нових інструментів, здатних трансформувати СУОП з системи «фіксації порушень» у систему «прогнозування ризиків». Перспективним напрямом є інтеграція технологій штучного інтелекту для аналізу великих масивів даних та підтримки прийняття рішень, що дозволяє реалізувати проактивну стратегію управління.

Матеріали та методи. Методологічну основу роботи становить системний підхід

до аналізу безпеки складних соціо-технічних систем. У дослідженні використано наступні методи:

- бібліографічний аналіз наукових джерел за період 2016–2025 рр. для виявлення тенденцій розвитку СУОП та методів оцінки ризиків;

- порівняльний аналіз моделей причинності аварій (від лінійних до системних) для визначення їхніх обмежень у сучасному промисловому контексті;

- синтез теоретичних положень концепцій «Safety-II», «Ситуаційної обізнаності» та «Human-AI Teaming» для розробки концептуальної моделі проактивного управління.

Результати та дискусії. Фундаментом традиційної безпеки на виробництві тривалий час слугувала «Теорія Доміно» Г. Генріха (1931), яка постулювала, що 88% аварій спричинені «небезпечними діями» працівників [1]. Цей підхід сформував реактивну культуру управління, зосереджену на контролі поведінки персоналу та дотриманні інструкцій. Однак сучасні дослідження вказують на те, що така модель є надмірно спрощеною, оскільки ігнорує системні організаційні збої та складні взаємодії між людиною, технологією та середовищем [6].

Для формалізації відмінностей між традиційним та пропонованим підходами, проведено порівняльний аналіз ключових параметрів обох парадигм (табл. 1), що дозволяє чітко окреслити область застосування інтелектуальних моделей.

Перехід до системного мислення (модель «Швейцарського сиру» Дж. Різона, концепція Safety-II Е. Холлнагеля) змістив фокус на виявлення «латентних умов» та забезпечення резильєнтності системи. Безпека розглядається не як відсутність інцидентів, а як наявність здатності системи успішно функціонувати в умовах варіабельності [5]. Це вимагає від СУОП моніторингу не лише збоїв, а й успішних операцій та слабких сигналів, що передують інцидентам.

Критичною проблемою сучасних СУОП є залежність від «відстаючих показників», таких як коефіцієнти частоти травматизму. В роботі [2] дослідники зазначають, що ці показники вимірюють невдачу системи, а не ефективність превентивних заходів. Спроби впровадити «випереджаючі показники» часто наштовхуються на проблему валідності даних та складність інтерпретації. Існує розрив між збором даних (аудити, спостереження) та їх використанням для реального прогнозування. Традиційні статистичні методи не здатні виявити нелінійні кореляції між різнорідними факторами (наприклад, рівнем втоми працівника, зміною погодних умов та порушенням процедур) [2].

Для ефективного проактивного управління фахівець СУОП повинен володіти високим рівнем ситуаційної обізнаності (далі – SA). Згідно з моделлю М. Ендслі, найвищим рівнем SA є «проекція» – здатність передбачити майбутній стан системи. В умовах інформаційного перевантаження людина фізично не здатна обробити масиви даних для досягнення цього рівня.

Тут на допомогу приходять технології штучного інтелекту. Дослідження 2025 року [4] демонструють, що використання ансамблевих методів машинного навчання дозволяє досягти високої точності прогнозування інцидентів. На відміну від простих регресійних моделей, алгоритми ефективно працюють з нелінійними даними та дозволяють важливості факторів, виокремлюючи критичні визначати ієрархію предиктори, такі як відхилення від техпроцесу або накопичена втома [4]

Наукова новизна запропонованого підходу полягає в зміні математичної логіки оцінки

безпеки. Якщо в класичній моделі ризик R визначається статично як добуток ймовірності та наслідків ($R = P \times C$) то в рамках запропонованої концепції безпека системи $S(t)$ розглядається як динамічна функція від чотирьох потенціалів резильєнтності:

$$S(t) = f(M, A, R, L)$$

де:

M (monitor) – здатність системи моніторити поточний стан (забезпечується збором масиву даних);

A (anticipate) – здатність передбачати майбутні загрози (реалізується через ML-моделі прогнозування);

R (respond) – здатність своєчасно реагувати на відхилення (автоматизовані системи або підказки оператору);

L (Learn) – здатність навчатися на основі досвіду (оновлення датасетів).

Таблиця 1

Результати порівняння стратегій управління ризиками в СУОП

Критерії порівняння	Реактивна стратегія (Safety-I)	Проактивна стратегія (Safety-II)
Базова модель причинності	Лінійна («Теорія Доміно» Г. Генріха)	Системна
Фокус управління	Розслідування інцидентів (що пішло не так?)	Моніторинг нормальної роботи (що йде так?)
Ключові метрики	Відстаючі показники: частота травматизму	Випереджаючі індикатори: рівень втоми, поведінкові маркери, ІКР
Роль людського фактора	Джерело помилки, слабка ланка	Гнучкий елемент, що забезпечує адаптивність системи
Інструмент аналізу	Ретроспективний статистичний аналіз	Предиктивне моделювання
Реакція на ризик	Покарання та нові інструкції після аварії	Інтервенція до моменту настання події

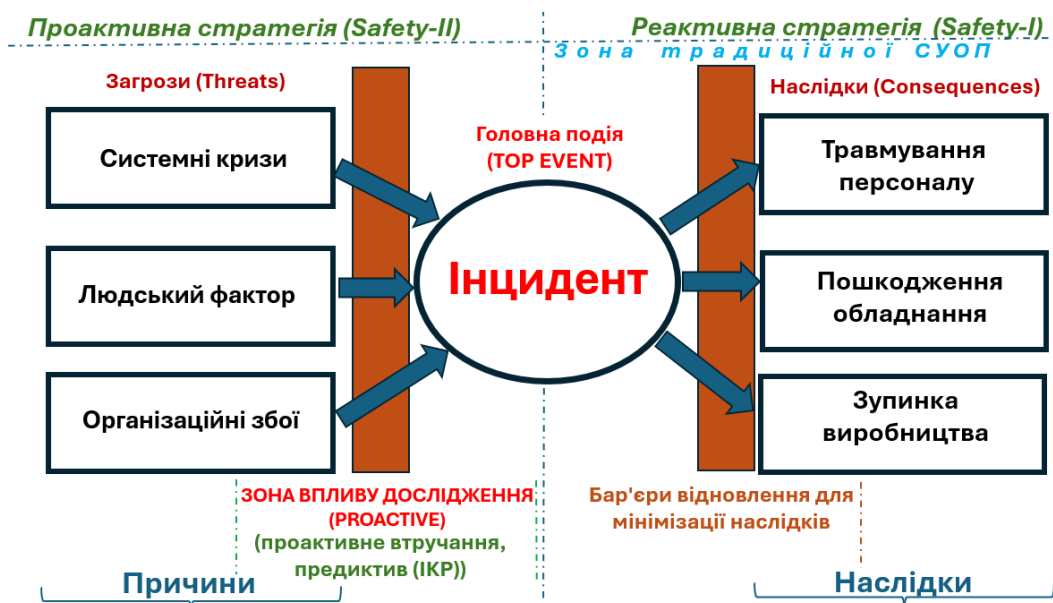


Рис. 2. Модель «Краватка-метелик» інтеграції предиктивної системи в контур управління безпекою

Використання технологічних алгоритмів дозволяє максимізувати потенціал А (anticipate), перетворюючи систему з реактивної на проактивну.

Впровадження даних інструментів не повинно замінювати людину, а має змінювати характер взаємодії. В роботі [5] дослідник пропонує концепцію «Human-AI Teaming» на основі функцій «предиктор-коректор» у такій архітектурі:

1. Технологічні алгоритми аналізують дані в реальному часі та генерує прогноз ризику), забезпечуючи технічну основу для певного рівня ситуаційної обізнаності.

2. Людина-коректор отримує прогноз, інтерпретує його з урахуванням контексту (який може бути недоступний машині) та приймає рішення про втручання (зупинка робіт, додатковий інструктаж і т.п.) [5].

Така взаємодія дозволяє врахувати критичні фактори змінного середовища (наприклад, стрес внаслідок зовнішніх криз), які суттєво

впливають на безпеку, але часто ігноруються традиційними моделями [3].

Висновки. Еволюція СУОП вимагає відмови від виключно реактивних стратегій на користь проактивних моделей, заснованих на даних. Традиційні методи оцінки ризиків досягли межі своєї ефективності в умовах сучасних складних систем.

Використання алгоритмів машинного навчання є науково обґрунтованим методом для виявлення прихованих патернів аварійності та прогнозування інцидентів з високою точністю.

Перспективним напрямом розвитку СУОП є створення інструментарію, що підвищує ситуаційну обізнаність фахівців через візуалізацію ієрархії критичних факторів ризику та реалізацію концепції Human-AI Teaming, де технологічні алгоритми виступають інструментами підтримки прийняття рішень, а не їх автоматичними імплементаторами.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бочковський А.П., Сажошнікова Н.Ю. Теорія і практика оцінювання ризиків виникнення професійних небезпек. *Зернові продукти і комбікорми*. 2018. Т. 18 (№ 2). С. 4–10.
2. Haas E. J., Yorio P. L. Exploring the state of health and safety management system performance measurement in mining organizations. *Safety Science*. 2016. Vol. 83. P. 48–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.009>.
3. Milošević I., Stojanović A., Nikolić Đ., Mihajlović I., Brkić A., Perišić M., Spasojević-Brkić V. Occupational health and safety performance in a changing mining environment: Identification of critical factors. *Safety Science*. 2025. Vol. 184. Art. 106745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106745>.
4. Rao E. V. R., Pandey A. Industrial Accident Analysis and Predictive Models for Workplace Hazard Prevention. *Disaster Advances*. 2025. Vol. 18 (6). P. 58–64. DOI: <https://doi.org/10.25303/186da058064>.
5. Slater D. Human-AI Teaming based on Collaborative Predictor-Corrector Functions. ResearchGate. 2025. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11348.46720>.
6. Salmon P. M., Cornelissen M., Trotter M. J. Systems-based accident analysis methods: A comparison of Accimap, HFACS, and STAMP. *Safety Science*. 2012. Vol. 50 (4). P. 1158–1170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.11.009>.
7. Кружилко О. Є., Чеберячко С.І., Володченко Н.В., Репін М.В., Майстренко В.В. Методика побудови математичної моделі прогнозування ризиків для стратегічного планування заходів із безпеки праці. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 5. С. 316–322. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-36>.
8. Laitinen H., Vuorinen M., Simola A., Yrjänheikki E. Observation-based proactive OHS outcome indicators – Validity of the Elmeri+ method. *Safety Science*. 2013. Vol. 54. P. 69–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.11.005>.
9. Grant E., Salmon P. M., Stevens N. J., Goode N., Read G. J. M. Back to the future: What do accident causation models tell us about accident prediction? *Safety Science*. 2018. Vol. 104. P. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.12.018>.
10. Delikhon M., Zarei E., Valdez Banda O., Faridan M., Habibi E. System thinking-based accident analysis models: A systematic review for sustainable safety management. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 10. Art. 5869. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14105869>.

REFERENCES:

1. Bochkovskyi, A. P., & Sapozhnikova, N. Yu. (2018). Teoriia i praktyka otsiniuvannia ryzykiv vynyknennia profesiynykh nebezpek [The theory and practice of risk assessment of professional dangers]. *Zernovi produkty i kombikormy – Grain Products and Mixed Fodder's*, 18(2), 4–10. <https://doi.org/10.15673/gpmf.v18i2.934> [in Ukrainian].

2. Haas, E. J., & Yorlano, P. L. (2016). Exploring the state of health and safety management system performance measurement in mining organizations. *Safety Science*, 83, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.009>.
3. Milošević, I., Stojanović, A., Nikolić, Đ., Mihajlović, I., Brkić, A., Perišić, M., & Spasojević-Brkić, V. (2025). Occupational health and safety performance in a changing mining environment: Identification of critical factors. *Safety Science*, 184, 106745. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106745>.
4. Rao, E. V. R., & Pandey, A. (2025). Industrial Accident Analysis and Predictive Models for Workplace Hazard Prevention. *Disaster Advances*, 18(6), 58–64. <https://doi.org/10.25303/186da058064>.
5. Slater, D. (2025). Human-AI Teaming based on Collaborative Predictor-Corrector Functions. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12348.46720>.
6. Salmon, P. M., Cornelissen, M., & Trotter, M. J. (2012). Systems-based accident analysis methods: A comparison of Accimap, HFACS, and STAMP. *Safety Science*, 50(4), 1158–1170. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.11.009>.
7. Kruzhilko, O. Ye., Cheberiyachko, S. I., Volodchenkova, N. V., Repin, M. V., & Maistrenko, V. V. (2025). Metodyka pobudovy matematychnoi modeli prohnozuvannya ryzykiv dlia stratehichnoho planuvannya zakhodiv iz bezpeky pratsi [Methodology for building a mathematical model for predicting risks in strategic planning of occupational safety measures]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky – Metinvest Polytechnic Scientific Journal. Series: Technical Sciences*, (5), 316–322. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-36> [in Ukrainian].
8. Laitinen, H., Vuorinen, M., Simola, A., Yrjänheikki, E. (2013). Observation-based proactive OHS outcome indicators – Validity of the Elmeri+ method. *Safety Science*. Vol. 54. P. 69–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.11.005>.
9. Grant, E., Salmon, P. M., Stevens, N. J., Goode, N., Read, G. J. M. (2018). Back to the future: What do accident causation models tell us about accident prediction? *Safety Science*. Vol. 104. P. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.12.018>.
10. Delikhoon, M., Zarei, E., Valdez Banda, O., Faridan, M., Habibi, E. (2022). System thinking-based accident analysis models: A systematic review for sustainable safety management. *Sustainability*. Vol. 14, no. 10. Art. 5869. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14105869>.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 10.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 331.45

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-29>

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ПРОФЕСІЙНИМИ РИЗИКАМИ В УКРАЇНІ: ІНТЕГРАЦІЯ СТАНДАРТІВ ТА ПРАКТИКА ОЦІНЮВАННЯ

Кружилко Олег Євгенович,

доктор технічних наук,

професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-8624-1515

Майстренко Володимир Володимирович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-9827-0460

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

Демчук Гліб Вікторович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3939-5516

Мета дослідження – обґрунтувати підходи до підвищення результативності управління охороною праці шляхом дослідження результативності використання різних методів оцінювання професійного ризику як інтегрального показника, який забезпечує раціональне планування профілактичних заходів на виробництві. У дослідженні застосовано системний та ризикорієнтований підходи, методи аналізу та узагальнення наукових публікацій, експертні оцінки, а також кількісні методи оцінювання професійних ризиків. Для порівняльного аналізу використано модифікований метод Елмері та модифікований матричний метод з урахуванням умов праці, організації системи управління охороною праці та рівня культури безпеки. Емпіричною базою дослідження слугували статистичні дані щодо виробничих інцидентів на промисловому підприємстві.

Установлено, що зниження рівня професійного ризику може розглядатися не лише як показник стану безпеки праці, а і як критерій результативності ухвалених управлінських рішень. Порівняльний аналіз засвідчив, що модифікований метод Елмері є більш інформативним за прийнятного та середнього рівнів ризику, тоді як при високих і неприйнятних ризиках доцільним є застосування модифікованого матричного методу. Запропоновано рекомендації щодо вибору методу оцінювання ризиків залежно від виробничих умов. Результати дослідження узгоджуються з положеннями стандартів ISO 45001 та ISO 31000:2018 щодо ризикорієнтованого управління та можуть бути використані як методичне підґрунтя для інтеграції процедур оцінювання професійних ризиків у чинну систему менеджменту охорони праці підприємств.

Результати отримані на основі даних одного підприємства та можуть потребувати адаптації для інших галузей промисловості з урахуванням специфіки небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Отримані результати можуть бути використані керівниками та фахівцями з охорони праці для обґрунтованого планування профілактичних заходів, оцінювання ефективності витрат на безпеку та підвищення дієвості систем управління охороною праці. Наукова новизна полягає в інтеграції оцінювання професійного ризику з процесом ухвалення управлінських рішень та обґрунтування комбінованого використання методів оцінки ризиків залежно від їх рівня, що підвищує достовірність та практичну придатність результатів.

Ключові слова: професійний ризик, управління, міжнародний стандарт, безпека праці, планування заходів.

Kruzhilko Oleg, Maistrenko Volodymyr, Karakay Maksim, Demchuk Hlib. Modern approaches to occupational risk management in Ukraine: integration of standards and assessment practices

The purpose of the study is to substantiate approaches to increasing the effectiveness of occupational safety management by studying the effectiveness of using various methods of assessing occupational risk as an integral indicator that ensures rational planning of preventive measures in production. The study used systemic and risk-oriented approaches, methods of analysis and generalization of scientific publications, expert assessments, as well as quantitative methods of assessing occupational risks. For comparative analysis, the modified Elmer method and the modified matrix method were used, taking into account working conditions, the organization of the occupational safety management system and the level of safety culture.

The empirical basis of the study was statistical data on industrial incidents at an industrial enterprise. It was established that reducing the level of occupational risk can be considered not only as an indicator of the state of occupational safety, but also as a criterion for the effectiveness of management decisions taken. Comparative analysis showed that the modified Elmer method is more informative at acceptable and medium risk levels, while at high and unacceptable risks it is advisable to use the modified matrix method. Recommendations are proposed for choosing a risk assessment method depending on production conditions. The results of the study are consistent with the provisions of the ISO 45001 and ISO 31000:2018 standards on risk-based management and can be used as a methodological basis for integrating occupational risk assessment procedures into the existing occupational health and safety management system of enterprises.

The results are obtained based on data from one enterprise and may require adaptation for other industries, taking into account the specifics of dangerous and harmful production factors. The results obtained can be used by managers and occupational health and safety specialists for informed planning of preventive measures, assessment of the effectiveness of safety costs and improvement of the effectiveness of occupational health and safety management systems. The scientific novelty lies in the integration of occupational risk assessment with the process of making managerial decisions and the justification of the combined use of risk assessment methods depending on their level, which increases the reliability and practical applicability of the results.

Key words: occupational risk, management, international standard, occupational safety, event planning.

Вступ. Згідно зі статтею 4 Закону України «Про охорону праці», державна політика в галузі охорони праці спрямована на створення належних, безпечних і здорових умов праці, запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням [1]. Схвалена Кабінетом Міністрів України Концепція реформування системи управління охороною праці в Україні та міжнародне законодавство зумовлюють необхідність побудувати систему управління гігієною та безпекою праці на основі ризикорієнтованого підходу [2]. Побудова вказаної системи потребує наукових досліджень щодо формування методичного забезпечення процесів ідентифікації небезпек та оцінки професійних ризиків. В Україні сьогодні активно впроваджуються національні стандарти, гармонізовані з міжнародними та європейськими системами менеджменту.

ISO 45001 – це міжнародний стандарт, який визначає вимоги до системи управління охороною здоров'я та безпеки праці (OH&S). Він створений для того, щоб організації могли покращити безпеку працівників, зменшити ризики на робочих місцях і створити безпечні умови праці [3]. Головна мета ISO 45001 – забезпечити систематичний підхід до управління охороною праці, що сприяє: зниженню рівня виробничих травм і професійних захворювань, створенню безпечних умов праці, виконанню нормативно-правових вимог у сфері охорони праці, а також підвищенню загальної продуктивності

та ефективності організації через покращення умов праці. ISO 31000:2018 – це міжнародний стандарт, розроблений для забезпечення керівництва у сфері управління ризиками. Його основна мета – допомогти організаціям усіх типів і розмірів створити ефективну систему управління ризиками, яка дасть змогу ідентифікувати, оцінювати та управляти ризиками в усіх аспектах їхньої діяльності [4]. Головна мета стандарту ISO 31000 – створення принципів і рекомендацій для інтеграції управління ризиками в усі процеси організації. Управління ризиками є важливим елементом стратегічного планування, операційної діяльності та ухвалення рішень.

Аналіз останніх наукових досліджень і публікацій свідчить, що для підготовки обґрунтованих управлінських рішень особа, яка ухвалює рішення (ОПР), повинна володіти досить повною та достовірною інформацією про стан об'єкта управління, а також ефективними інструментами її обробки й аналізу. Проте на практиці процес ухвалення рішень у сфері охорони праці часто відбувається в умовах інформаційної неповноти та невизначеності. За цих умов особливого значення набуває використання експертних оцінок на різних етапах підготовки та ухвалення управлінських рішень.

Попри значний масив наукових досліджень, методичних рекомендацій і практичних розробок, присвячених удосконаленню системи управління безпекою праці на виробництві

шляхом запровадження ризикорієнтованого підходу, рівень їх реального впровадження в діяльність підприємств залишається недостатнім. У багатьох випадках наукові підходи до управління охороною праці декларуються на концептуальному рівні, проте не знаходять повноцінного практичного застосування в умовах конкретного виробництва. Це зумовлює розрив між теоретичними моделями управління професійними ризиками та фактичними результатами функціонування системи охорони праці [5; 6]. Крім того, очікувані результати впровадження запропонованих рішень часто не мають достатнього рівня обґрунтованості, що знижує довіру до таких підходів з боку керівників підприємств. Водночас саме зменшення рівня професійного ризику після реалізації комплексу заходів з охорони праці може розглядатися як один із найбільш інформативних показників результативності управління безпекою праці. У цьому контексті величина професійного ризику є не лише індикатором поточного стану безпеки на окремому робочому місці, у структурному підрозділі або на підприємстві загалом, а й критерієм оцінки ефективності конкретних управлінських рішень або програм заходів.

Мета статті – дослідити результативність методів оцінювання професійного ризику та формування рекомендації щодо їх раціонального застосування з урахуванням умов конкретного виробництва.

Матеріали та методи досліджень. Професійний ризик, як інтегральний показник, відображає імовірність виникнення небезпечних виробничих ситуацій та тяжкість можливих наслідків для життя і здоров'я працівників. Його визначення ґрунтується на аналізі сукупності технічних, організаційних, санітарно-гігієнічних та психофізіологічних факторів, які формують потенційну загрозу в процесі трудової діяльності. Так, використання професійного ризику як інструмента управління дає змогу перейти від формального виконання нормативних вимог до цілеспрямованого планування заходів, орієнтованих на реальне зниження небезпек.

У сучасних умовах особливої актуальності набуває питання розроблення та практичної апробації науково обґрунтованих підходів до планування заходів з підвищення рівня безпеки праці й поліпшення умов праці. Ідеться не лише про створення нових методів і методик оцінювання ризиків, а й про їх адаптацію до специфіки конкретних виробничих процесів, організаційних структур і рівня ресурсного забезпечення підприємств.

Результати аналізу професійних ризиків стають основою не лише для атестації робочих

місць за умовами праці, а й для розробки планів заходів з охорони праці, що підсилює сталий ризикорієнтований підхід у менеджменті безпеки. Водночас у міжнародній практиці, а також у наукових публікаціях підкреслюється важливість ефективної організації систем управління безпекою праці навіть за обмежених ресурсів. Зокрема, результати досліджень показують, що системний підхід до моделювання та експертної оцінки ризиків дає змогу підприємствам послідовно знижувати рівень небезпек, плануючи превентивні заходи на основі реальної статистики травматизму та моніторингу умов праці.

У сучасній системі управління безпекою праці дедалі більшого значення набуває використання різноманітних масивів даних, спрямованих на запобігання виробничим інцидентам, нещасним випадкам та професійним захворюванням. До таких даних належать результати оцінювання технічного стану виробничого обладнання, параметри виробничого середовища, показники впливу шкідливих і небезпечних факторів, а також інформація щодо поведінкових аспектів діяльності працівників. Саме на основі аналізу цих даних формується уявлення про рівень професійного ризику, що є підґрунтям для ухвалення управлінських рішень у сфері охорони праці.

Актуальність використання методу Елмері для оцінки професійного ризику підтверджується результатами його впровадження на підприємствах різних видів економічної діяльності [7; 8]. Метод заснований на спостереженні за умовами праці на робочому місці. Пропонується модифікація вказаного методу: рівень професійних ризиків для окремого робочого місця (підрозділу, підприємства загалом) оцінюється за індексом безпеки (індекс Елмері), який визначає співвідношення суми вагових коефіцієнтів виробничих факторів, що відповідають вимогам чинних документів, до загальної суми вагових коефіцієнтів виробничих факторів:

$$I_E = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x v_i}{\sum_{i=1}^{n_1} x v_i + \sum_{j=1}^{n_2} x r_j}, \quad (1)$$

де I_E – індекс Елмері; $x v_i$ – ваговий коефіцієнт фактору, що визначає його вплив на професійний ризик (для факторів, рівень яких відповідає вимогам нормативних документів); $x r_j$ – ваговий коефіцієнт фактору, що визначає його вплив на професійний ризик (для факторів, рівень яких не відповідає вимогам нормативних документів, фактори що зумовлюють ризик); n_1, n_2 – відповідно кількість виробничих факторів, рівень

яких відповідає та не відповідає вимогам нормативних документів.

При цьому стан максимальної безпеки відповідає $I_E = 1$, а стан повної небезпеки: $I_E \rightarrow 0$. Тоді професійний ризик визначається в такий спосіб:

$$R = 1 - I_E. \quad (2)$$

Для оцінки професійного ризику методом експертних оцінок отримано такі рівні градації: R_1 – прийнятний (0 ... 0,25), R_2 – середній (0,25 ... 0,5), R_3 – високий (0,5 ... 0,75), R_4 – неприйнятний (0,75 ... 1).

Інший підхід [9] передбачає використання розрахункового показника, що дає змогу врахувати вплив рівня організації системи управління охороною праці на величину професійного ризику. Загальна оцінка професійного ризику, пов'язаного з конкретно ідентифікованою небезпекою чи небезпечною діяльністю, визначається за формулою:

$$R = P \cdot T \cdot S \cdot A \cdot N \cdot C, \quad (3)$$

де P – імовірність настання події, пов'язаної з конкретно ідентифікованою небезпекою; S – інтенсивність та/або тяжкість наслідків впливу події, пов'язаної з конкретно ідентифікованою небезпекою чи небезпечною діяльністю; A – ефективність функціонування на промисловому підприємстві системи управління безпекою праці та здоров'я працівників; N – рівень культури безпеки праці на промисловому підприємстві; C – рівень компетентності персоналу промислового підприємства.

Оскільки в запропонованому підході враховано ймовірність настання події, пов'язаної з конкретно ідентифікованою небезпекою,

інтенсивність та/або тяжкість наслідків впливу події, такий підхід є, по суті, модифікованим матричним методом оцінки ризику. Прийнятність професійного ризику кожної з ідентифікованих небезпек чи небезпечної діяльності визначається шляхом дослідження цих шести величин за шкалою від 1 до 5 та визначаються на основі експертних оцінок.

Результати. Для забезпечення можливості порівняльної оцінки результатів оцінювання ризиків у дослідженні пропонується використовувати нормовані значення для кожного з розрахункових показників. У кожний момент часу може бути отримано $Y'_{t,i}$ – нормоване значення i -го показника $Y_{t,i}$, яке розраховується за формулою:

$$Y'_{t,i} = \frac{Y_{t,i} - Y_t^{\min}}{Y_t^{\max} - Y_t^{\min}}, \quad Y'_{t,i} \in [0; 1], \quad (4)$$

де $Y_t^{\max}$, $Y_t^{\min}$ – відповідно максимальне та мінімальне розрахункове значення показника Y_t (визначаються за результатами статистичної обробки даних).

Дослідження проведено на одному з металургійних підприємств шляхом обліку та аналізу інцидентів: достовірні кількісні дані різних часових періодів (період – місяць), отримані емпіричним шляхом, що характеризують імовірність настання наслідків подій, які потенційно несуть загрозу життю й здоров'ю людей, але не відбулися. При цьому рівень інцидентів відповідає періоду $t+1$ (тобто наступний за періодом t , у який оцінено професійний ризик).

Обробка зібраних статистичних даних з використанням формул (1) – (4) дала змогу отримати результати оцінювання професійних ризиків різними методами. Результати представлені на рис. 1.

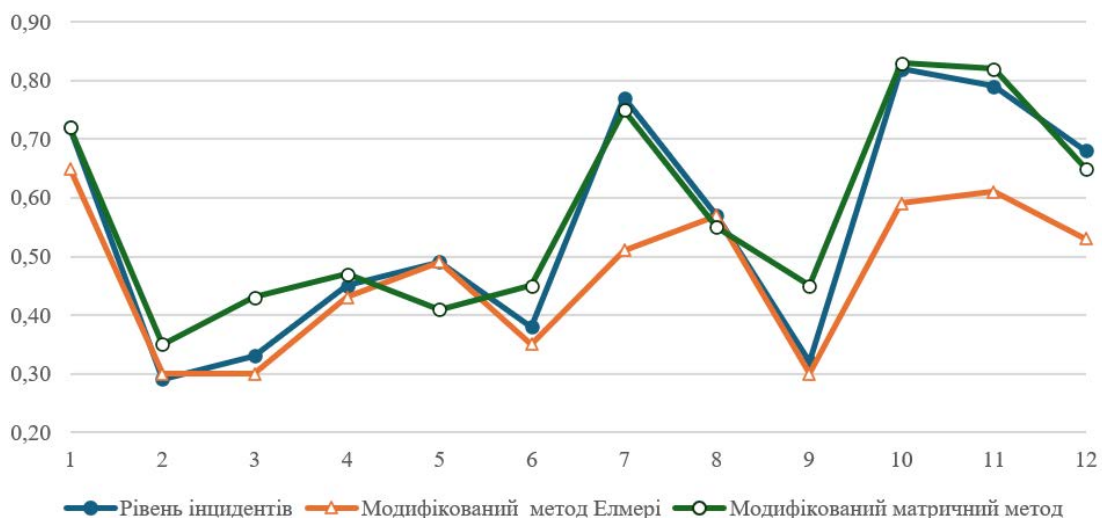


Рис. 1. Результати оцінювання професійних ризиків різними методами

Аналіз отриманих результатів свідчить, що за умов прийняттого та середнього рівнів професійного ризику найбільш адекватні результати оцінювання забезпечує модифікований метод Елмері, який характеризується достатньою чутливістю до змін умов праці та простотою практичного застосування. У разі переходу ризику до високого або неприйняттого рівня більш інформативним є модифікований матричний метод, що дає змогу комплексно враховувати ймовірність настання небезпечних подій, тяжкість їх наслідків, а також організаційні чинники функціонування системи управління охороною праці.

Отримані результати дослідження безпосередньо узгоджуються з вимогами стандарту ISO 45001:2018. Зокрема, запропонований комбінований підхід до оцінювання професійних ризиків забезпечує реалізацію вимог п. 6.1.2 стандарту шляхом диференційованого вибору методів оцінювання залежно від рівня ризику, що підвищує обґрунтованість планування превентивних заходів. Крім того, застосування модифікованих методів Елмері та матричного методу відповідає вимогам п. 8.1 «Операційне планування та управління» ISO 45001, оскільки дає змогу встановлювати керовані параметри виробничих процесів, контролювати рівень професійних ризиків та своєчасно коригувати заходи з охорони праці. Отже, запропонований підхід створює методичну основу для практичної інтеграції процедур оцінювання ризиків у систему управління охороною праці відповідно до міжнародних вимог. Практичне значення

отриманих результатів полягає в можливості їх використання під час формування та коригування планів заходів з охорони праці, зокрема для пріоритезації превентивних дій у зонах підвищеного ризику. Запропонований підхід не потребує складного програмного забезпечення або значних додаткових ресурсів, що забезпечує його придатність для впровадження на підприємствах різних видів економічної діяльності.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що результативність системи управління охороною праці безпосередньо залежить від адекватності вибору методів оцінювання професійних ризиків з урахуванням рівня небезпеки та специфіки виробничих умов. Обґрунтовано доцільність застосування комбінованого підходу, який поєднує модифікований метод Елмері та модифікований матричний метод, що забезпечує підвищення достовірності оцінювання ризиків у широкому діапазоні їх значень. Доведено, що використання одного універсального методу не дає змоги отримати достатньо надійні результати на всіх етапах управління ризиками.

Практична апробація запропонованого підходу на металургійному підприємстві підтвердила його придатність як інструмента підтримки прийняття управлінських рішень у сфері охорони праці. Отримані результати узгоджуються з принципами стандарту ISO 31000:2018 щодо системного та інтегрованого управління ризиками, а також з вимогами ISO 45001 щодо ідентифікації небезпек, оцінювання ризиків і планування заходів з їх зниження.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2695-XII. Дата оновлення: 01.01.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 18.12.2025)
2. Про схвалення Концепції реформування системи управління охороною праці в Україні та затвердження плану заходів щодо її реалізації : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 12.12.2018 р. № 989-р. Дата оновлення: 23.07.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/989-2018-%D1%80?lang=ru> (дата звернення: 18.12.2025)
3. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems. Requirements with guidance for use. URL: <https://www.iso.org/iso-45001-occupational-health-and-safety.html> (дата звернення: 18.12.2025)
4. ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT) URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 (дата звернення: 18.12.2025)
5. Петрищев А. С., Семірягін С. В., Смірнов О. М., Смірнов Ю. О. Зниження професійних ризиків для здоров'я працівників і покращення екологічної безпеки навколишнього середовища при очищенні промислових викидів металургійних підприємств. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2023. Вип. 39 (1–2). С. 55–61. <https://doi.org/10.36804/nndipbor.39-1-2.2023.55-61>
6. Бочковський А. П., Сапожнікова Н. Ю. Концепція проактивного керування охороною праці на підприємствах. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2023. Вип. 39 (3–4). С. 28–35. <https://doi.org/10.36804/nndipbor.39-3-4.2023.28-35>
7. Kruzhilko O., Volodchenkova N., Maystrenko V., Bolibrukh B., Kalinchyk V., Zakora A., Feshchenko A., Yeremenko S. Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprises. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2021. № 108 (1). P. 35–41 URL: <https://journalamme.org/resources/html/article/details?id=224392> (дата звернення: 18.12.2025)

8. Ткалич І. М. Теоретичні основи побудови методики оцінки професійного ризику, прийнятної для підприємств різних видів економічної діяльності. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2019. № 3(116). С. 113–119.

9. Голінько В. І., Чеберячко Ю. І., Дерюгін О. В., Архирей М. М. Удосконалення процедури оцінки професійного ризику на промисловому підприємстві. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2022. Вип. 38 (1–2). С. 3–14. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.38-1-2.2022.3-14>

REFERENCES:

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (1992). *Pro okhoronu pratsi* [On labour protection] (Law of Ukraine No. 2695-XII, October 14, 1992; updated January 1, 2025). Retrieved December 18, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> [in Ukrainian].

2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2018). *Pro skhvalennia Kontseptsii reformuvannia systemy upravlinnia okhoronoiu pratsi v Ukraini ta zatverdzhennia planu zakhodiv shchodo yii realizatsii* [On approval of the Concept for reforming the occupational safety management system in Ukraine and approval of the action plan for its implementation] (Order No. 989-r, December 12, 2018; updated July 23, 2020). Retrieved December 18, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/989-2018-%D1%80> [in Ukrainian].

3. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use*. Retrieved December 18, 2025, from <https://www.iso.org/iso-45001-occupational-health-and-safety.html>

4. Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality. (2018). *DSTU ISO 31000:2018. Menedzhment ryzykiv. Pryntsypy ta nastanovy (ISO 31000:2018, IDT)* [Risk management—Principles and guidelines]. Retrieved December 18, 2025, from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80322 [in Ukrainian].

5. Petryshchev, A. S., Semiriahin, S. V., Smirnov, O. M., & Smirnov, Y. O. (2023). Znyzhennia profesiinykh ryzykiv dlia zdorovia pratsivnykiv i pokrashchennia ekolohichnoi bezpeky navkolyshnoho seredovyscha pry ochyshchenni promyslovykh vykydyv metalurhiinykh pidpriemstv [Reduction of occupational health risks and improvement of environmental safety during purification of industrial emissions of metallurgical enterprises]. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini*, 39(1–2), 55–61. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.39-1-2.2023.55-61> [in Ukrainian].

6. Bochkovskyi, A. P., & Sapozhnikova, N. Y. (2023). *Kontseptsiiia proaktyvnoho keruvannia okhoronoiu pratsi na pidpriemstvakh* [Concept of proactive occupational safety management at enterprises]. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini*, 39(3–4), 28–35. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.39-3-4.2023.28-35> [in Ukrainian].

7. Kruzhilko, O., Volodchenkova, N., Maystrenko, V., Bolibrukh, B., Kalinchyk, V., Zakora, A., Feshchenko, A., & Yeremenko, S. (2021). Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprises. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 108(1), 35–41. Retrieved December 18, 2025, from <https://journalamme.org/resources/html/article/details?id=224392>

8. Tkalych, I. M. (2019). Teoretychni osnovy pobudovy metodyky otsinky profesiinoho ryzyku, pryiniatnoi dlia pidpriemstv riznykh vydiv ekonomichnoi diialnosti [Theoretical foundations for developing an occupational risk assessment methodology suitable for enterprises of various economic activities]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 3(116), 113–119 [in Ukrainian].

9. Holinko, V. I., Cheberiachko, Y. I., Deriuhin, O. V., & Arkhirei, M. M. (2022). Udoskonalennia protsedury otsinky profesiinoho ryzyku na promyslovomu pidpriemstvi [Improvement of the occupational risk assessment procedure at an industrial enterprise]. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini*, 38(1–2), 3–14. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.38-1-2.2022.3-14> [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 02.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 666.961

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-30>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРГОНОМІЧНИХ РИЗИКІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ОПОРНО-РУХОВИЙ АПАРАТ УЧНІВ

Цимбал Богдан Михайлович,

доктор наук з державного управління, доцент,
професор кафедри підвищення кваліфікації та спеціалізованої підготовки
у сфері цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України
ORCID ID: 0000-0002-2317-3428

Вендичанський Данило Григорович,

учень 11-А класу
Комунального закладу «Харківський ліцей № 69 Харківської міської ради»
ORCID ID: 0009-0001-9813-7800

У статті розглянуто ергономічні ризики в навчальній та побутовій діяльності школярів в умовах зростання статичних навантажень і поширення нефізіологічних робочих поз. Актуальність дослідження зумовлена інтенсивними морфофункціональними змінами опорно-рухового апарату в підлітковому віці – у критичний період формування рухових стереотипів, що впливають на стан здоров'я в подальшому житті. Тривале сидіння, активне використання цифрових пристроїв та виконання побутових фізичних робіт сприяють накопиченню несприятливих біомеханічних навантажень і підвищують ризик розвитку м'язово-скелетних порушень у здобувачів освіти. Для оцінювання біомеханічних особливостей робочих поз і рухів застосовано відеоаналіз із використанням алгоритмів комп'ютерного зору в поєднанні з міжнародною методикою REBA. Такий підхід забезпечив об'єктивне визначення кутів у суглобах, нахилів тулуба, ротаційних рухів та асиметрій під час виконання типових рухових дій. За результатами дослідження встановлено переважання надмірних нахилів тулуба, що перевищують фізіологічні межі, нефізіологічних положень голови та торсійних рухів корпусу під навантаженням. Згідно з методикою REBA, виявлені рухові стереотипи відповідають високому рівню ергономічної небезпеки. Виявлені біомеханічні відхилення асоціюються з підвищенням навантаження на шийний і поперековий відділи хребта та можуть сприяти розвитку м'язового перенапруження, функціональних порушень та клінічних проявів з боку опорно-рухового апарату. Отримані результати підкреслюють доцільність раннього виявлення ергономічних ризиків та впровадження профілактичних заходів, спрямованих на корекцію рухових стереотипів, формування нейтральних поз і зниження надмірного біомеханічного навантаження.

Ключові слова: ергономічний ризик, опорно-руховий апарат, постава, школярі, штучний інтелект, комп'ютерний зір, REBA.

Tsybmal Bohdan, Vendychanskyi Danylo. Study of ergonomic risks and their impact on the musculoskeletal system of students

The article examines ergonomic risks in the educational and everyday activities of schoolchildren under conditions of increasing static loads and the widespread use of non-physiological working postures. The relevance of the study is determined by intensive morphofunctional changes in the musculoskeletal system during adolescence – a critical period for the formation of movement patterns that influence health status in later life. Prolonged sitting, active use of digital devices, and the performance of household physical tasks contribute to the accumulation of unfavorable biomechanical loads and increase the risk of developing musculoskeletal disorders among students. To assess the biomechanical characteristics of working postures and movements, video analysis using computer vision algorithms in combination with the international REBA method was applied. This approach ensured objective determination of joint angles, trunk inclinations, rotational movements, and asymmetries during the performance of typical motor activities. As a result, a predominance of excessive trunk flexion exceeding physiological limits, non-physiological head positions, and torsional movements of the torso under load was identified. According to the REBA methodology, the identified movement patterns correspond to a high level of ergonomic hazard. The identified biomechanical deviations are associated with increased loading of the cervical and lumbar regions of the spine and may contribute to the development of muscle overstrain, functional disorders, and clinical manifestations of the musculoskeletal system. The obtained results emphasize the feasibility of early identification of ergonomic risks and the implementation of preventive measures aimed at correcting movement patterns, forming neutral postures, and reducing excessive biomechanical loading.

Key words: ergonomic risk, musculoskeletal system, posture, schoolchildren, artificial intelligence, computer vision, REBA.

Вступ. У підлітковому віці відбуваються інтенсивні морфофункціональні зміни опорно-рухового апарату, формування постави та стабілізація рухових стереотипів, що визначають стан здоров'я людини в подальшому житті [1]. Саме в цей період хребет, зв'язково-м'язовий апарат та постуральні механізми є найбільш чутливими до зовнішніх навантажень і несприятливих ергономічних чинників. В умовах воєнного стану, дистанційного та змішаного навчання, а також проведення занять в укриттях суттєво зростає тривалість статичних навантажень і кількість нефізіологічних поз у школярів, що, за даними медичних та ергономічних досліджень, пов'язано зі зростанням частоти м'язово-скелетних порушень і функціонального болю [2; 3].

Додатковими чинниками ризику є активне використання цифрових пристроїв, тривале перебування в положенні сидіння з нахилом голови вперед, а також виконання побутових фізичних робіт у домашньому середовищі без дотримання принципів безпечної біомеханіки. Тривале перебування в нефізіологічних позах призводить до перенапруження м'язів шиї та спини, порушення м'язового балансу й формування хронічного больового синдрому вже в підлітковому віці [2; 4]. У сукупності зазначені фактори зумовлюють високу медичну та соціальну значущість проблеми ергономічних ризиків у дітей і підлітків.

Сутність проблеми полягає в тому, що більшість ергономічних ризиків у дітей та підлітків залишаються неусвідомленими й не фіксуються на ранніх етапах, коли зміни мають функціональний та зворотний характер. Традиційні методи оцінювання постави та рухів ґрунтуються переважно на візуальному спостереженні, що не дає можливості точно визначити кутові відхилення, асиметрію навантажень і динамічні перевантаження опорно-рухового апарату. У зв'язку із цим застосування технологій штучного інтелекту та комп'ютерного зору розглядається як перспективний напрям медичної ергономіки, який забезпечує об'єктивну кількісну оцінку поз і рухів.

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження полягає у медико-ергономічному виявленні й оцінюванні ергономічних ризиків у школярів під час навчальної та побутової діяльності із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту та визначенні їх впливу на стан опорно-рухового апарату.

Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити такі завдання:

– проаналізувати основні види ергономічних ризиків, характерних для навчальної та побутової фізичної діяльності учнів;

– дослідити біомеханічні особливості робочих поз і рухів із використанням комп'ютерного зору та методики REBA;

– оцінити потенційний вплив виявлених ергономічних порушень на опорно-руховий апарат із позицій медицини;

– розробити практичні рекомендації профілактичного спрямування щодо зменшення ризику формування м'язово-скелетних порушень у школярів.

Матеріали та методи дослідження. Об'єкт дослідження – стан опорно-рухового апарату учнів у процесі навчальної та побутової фізичної діяльності.

Предмет дослідження – ергономічні ризики та біомеханічні порушення поз і рухів учнів, визначені за допомогою технологій штучного інтелекту, та їх вплив на здоров'я.

Методи дослідження передбачають: аналіз науково-медичної та ергономічної літератури; відеоспостереження; алгоритми комп'ютерного зору; аналіз ключових анатомічних точок тіла; міжнародну методику оцінювання ергономічного ризику REBA; порівняльний та узагальнюючий аналіз отриманих даних.

Дослідження має прикладний характер і спрямоване на вирішення актуального медико-профілактичного завдання – зниження ризику формування порушень опорно-рухового апарату в учнів шляхом об'єктивного аналізу рухів і впровадження коригувальних рекомендацій.

Теоретико-медичні аспекти ергономічних ризиків у навчальній та побутовій діяльності підлітків. Наукові дослідження ергономічних ризиків у дітей і підлітків формуються на перетині медицини, біомеханіки, ергономіки, фізичної реабілітації та громадського здоров'я. Актуальність цієї проблематики зумовлена особливостями підліткового віку, коли відбувається інтенсивний ріст кісткових структур, становлення м'язового корсету та стабілізація постурального контролю. У цей період навіть помірні, але тривалі нефізіологічні навантаження можуть закладати передумови для стійких функціональних і структурних порушень опорно-рухового апарату.

Фундамент теоретико-медичного розуміння проблеми сформовано у вітчизняних працях з біомеханіки та кінезіології. Зокрема, у монографії В. О. Кашуби та Ю. А. Пападюхи системно висвітлено закономірності просторової організації тіла, механізми формування постави та роль м'язового балансу в забезпеченні стабільності хребта. Показано, що в дитячому й підлітковому віці порушення нейтральної пози тіла призводять не лише до косметичних змін, а й до порушень

біомеханіки рухів, перерозподілу навантажень та зниження функціональних резервів організму [1]. Зазначені положення становлять методологічну основу для медичної оцінки ергономічних ризиків у навчальній діяльності.

Сучасний етап розвитку наукової думки характеризується посиленням епідеміологічного підходу. Міжнародні дослідження переконливо демонструють зв'язок між поведінковими чинниками та м'язово-скелетним здоров'ям підлітків. Так, у роботі L. Da Costa та співавторів встановлено статистично значущий зв'язок між сидячою поведінкою та поширеністю болю в шиї і спині, що дає змогу розглядати тривале сидіння як незалежний фактор ризику [2]. Аналогічні за змістом результати отримано в дослідженнях, присвячених впливу дистанційної діяльності, де показано опосередкований зв'язок між зростанням тривалості сидіння та формуванням м'язово-скелетного болю [3].

Доповнюють ці висновки спостережні дослідження фізичної активності дітей у повсякденних умовах. Зокрема, A. J. Woods та співавтори показали, що навіть поза межами навчального процесу в дітей переважають сидячі форми діяльності, а рівень спонтанної рухової активності залишається недостатнім для забезпечення гармонійного розвитку опорно-рухового апарату [5]. Автори підкреслюють, що така модель поведінки формується з раннього віку та зберігається в підлітковий період, підсилюючи негативний вплив навчальних ергономічних навантажень.

Водночас аналіз літератури свідчить, що значна частина досліджень має описовий характер або зосереджується на окремих чинниках ризику, не враховуючи комплексної дії навчальних і побутових навантажень. Недостатньо представленими залишаються роботи, які поєднують медичний аналіз з об'єктивними біомеханічними вимірюваннями в реальних умовах життєдіяльності підлітків.

З медико-біомеханічних позицій одним із провідних ергономічних ризиків у підлітків є тривале статичне навантаження, характерне для навчального процесу, виконання домашніх завдань і роботи із цифровими пристроями. Доведено, що домінування сидячих форм діяльності сприяє формуванню несприятливих рухових стереотипів, які зберігаються у старшому віці [5].

Окрему групу ризиків становить активне використання смартфонів і планшетів. Дослідження F. D. Banadaki та співавторів, а також наративний огляд I. G. Lee і S. J. Son показують, що систематичний нахил голови вперед

і фіксоване положення верхніх кінцівок спричиняють перенапруження м'язів шийно-комірцевої зони, змінюють біомеханіку ходи та негативно впливають на загальну постуральну стабільність [6; 7]. Це свідчить про системний характер ергономічно зумовлених порушень.

Біомеханічні механізми навантаження хребта під час фізичної роботи детально вивчені у класичних і сучасних дослідженнях. Моделювання Kim і Zhang показало суттєве зростання компресійних і зсувних навантажень у поперековому відділі хребта в разі асиметричного піднімання вантажів [8]. Marras та співавтори довели, що поєднання згинання та скручування тулуба є одним із найнебезпечніших рухових патернів [9]. Додатково встановлено, що обмежений робочий простір та несприятливі умови виконання фізичної роботи значно підвищують навантаження на хребет навіть за відносно невеликої маси вантажу [10].

Важливим чинником формування ергономічних ризиків є невідповідність навчального середовища антропометричним характеристикам учнів. Дослідження Castellucci та співавторів, а також Kaya і Erkarlan свідчать, що шкільні меблі часто не відповідають зросту та пропорціям тіла дітей, змушуючи їх тривалий час перебувати в нефізіологічних позах [11; 12]. Це створює хронічне навантаження на хребет і м'язовий апарат навіть за відсутності значних фізичних зусиль.

Тривалий вплив ергономічних ризиків у підлітковому віці асоціюється з формуванням порушень постави, хронічного болю в шиї та спині, зниженням м'язової витривалості та функціональних можливостей опорно-рухового апарату. Постуральні порушення можуть супроводжуватися вторинними змінами з боку дихальної системи та зниженням якості життя [13].

Вагоме значення мають медико-профілактичні підходи, спрямовані на формування раціональних рухових стереотипів. У наукових працях підкреслюється необхідність поєднання навчальної діяльності з регулярною руховою активністю та контролю тривалості статичних поз [14].

Сучасні профілактичні підходи передбачають організаційні та поведінкові інтервенції. Систематичні огляди підтверджують ефективність використання активних парт, динамічних форм організації навчання та залучення учнів до зменшення сидячої поведінки [15; 16]. Водночас більшість таких досліджень не містять об'єктивної біомеханічної оцінки поз та рухів.

Новим етапом розвитку наукових досліджень стало впровадження цифрових методів аналізу

ергономічних ризиків. Валідність інструментів оцінювання на основі комп'ютерного зору підтверджено в роботах Т. Agostinelli та співавторів [4]. Оглядові дослідження демонструють високий потенціал методів машинного навчання для автоматичного розпізнавання поз та кількісної оцінки ризиків [17; 18]. Практичну реалізацію таких підходів представлено в автоматизованих системах оцінки за методикою REBA [19].

Вагомий внесок у розвиток вітчизняної наукової думки зроблено в дослідженнях, присвячених ергономічним ризикам у професійній та навчальній діяльності суміжних контингентів, зокрема саперів і рятувальників [20–22]. Медичні аспекти проблеми поглиблено в роботах, присвячених професійним захворюванням опорно-рухового апарату [23; 24]. Педагогічний і середовищний вимір ергономіки розкрито в дослідженнях, присвячених створенню безпечного освітнього середовища [25], а також у працях із комплексної оцінки ергономічних ризиків у виробничих умовах, які можуть бути адаптовані до навчальної діяльності [26].

Аналіз ергономічних ризиків за допомогою штучного інтелекту. У дослідженні застосовано сучасні технології комп'ютерного зору й алгоритми штучного інтелекту для визначення робочих поз та оцінювання їхнього впливу на опорно-руховий апарат. Використання інструментів штучного інтелекту дало змогу отримати об'єктивні біомеханічні дані, які неможливо точно зафіксувати неозброєним оком або методами суб'єктивного спостереження. Такий підхід є особливо важливим у медичному контексті, оскільки дає змогу виявляти навіть мінімальні відхилення від нейтральної пози, здатні спричинити накопичувані мікротравми в підлітковому віці.

Експериментальне дослідження виконувалося на основі відеозаписів, отриманих під час виконання двох типових побутових дій: копання ґрунту та піднімання й перенесення вантажу. Для відеофіксації використовувався смартфон із можливістю запису відео у високій роздільній здатності, встановлений на штативі для забезпечення стабільності зображення. Камеру розміщували таким чином, щоб у кадрі повністю фіксувалися голова, шия, плечовий пояс, тулуб, таз і кінцівки. Забезпечувалося рівномірне освітлення, необхідне для коректного розпізнавання контурів тіла та ключових анатомічних точок алгоритмами комп'ютерного зору.

Після завершення зйомки відеоматеріали завантажувалися до спеціалізованої програми аналізу рухів SoterAI [27], яка використовує глибинні нейронні мережі для автоматичного

визначення ключових точок тіла в кожному кадрі. На етапі обробки вводилися додаткові параметри, зокрема маса вантажу, що забезпечувало підвищення точності розрахунків компресійного навантаження на поперековий відділ хребта й оцінювання ризиків перевантаження м'язів-стабілізаторів.

Алгоритми комп'ютерного зору формували динамічну скелетну модель тіла з визначенням положення голови, шиї, плечей, ліктів, осі хребта, тазу, колін та стоп. У кожному кадрі автоматично розраховувалися кути нахилу тулуба, амплітуда ротацій, асиметрія положення кінцівок і ступінь відхилення від нейтральної пози. Це дало змогу аналізувати не лише статичні положення з надмірними нахилами або скручуваннями, а й мікродинаміку рухів, що має принципове значення для медичної ергономіки з огляду на підвищену вразливість опорно-рухового апарату підлітків до короточасних і неправильно виконаних рухів.

Отримані біомеханічні дані автоматично інтегрувалися з алгоритмом REBA, який є міжнародно стандартизованою методикою оцінювання ризику робочих поз. На основі кутових характеристик система розраховувала рівень навантаження на ший, тулуб, плечовий пояс, поперековий відділ, верхні та нижні кінцівки під час руху. Подальше порівняння отриманих показників із нормативними медико-біомеханічними значеннями дало можливість визначити ступінь ергономічної небезпеки відповідно до шкали REBA та сформував об'єктивний ризик-профіль аналізованих дій.

За результатами аналізу програмним забезпеченням автоматично сформовано детальні звіти та відеоматеріали з візуалізацією найбільш небезпечних поз. На рис. 1 та 2 відмічені епізоди глибоких нахилів, ротацій та асиметрій тіла, а також наведено підсумкові бали ергономічного ризику. У звітах подано графічні позначення найбільш уразливих анатомічних ділянок і рекомендації щодо корекції техніки рухів, що стало основою подальшого медико-ергономічного аналізу та дало змогу визначити ключові загрози для опорно-рухового апарату.

Результати експериментального аналізу, наведеного в додатках А та Б, показали, що під час виконання обох видів фізичної діяльності – копання лопатою та піднімання / перенесення бетонного блоку масою 12 кг – формується складний комплекс біомеханічних порушень. Алгоритм SoterAI, який оцінює рухи покадрово й автоматично визначає положення сегментів тіла, відзначив повторюваність неправильних поз, значну глибину нахилів, різкі ротаційні рухи

та нестійкість положення тіла в умовах зовнішнього навантаження. Це дало можливість встановити, що ключові ризики не є випадковими, а проявляються у вигляді стійких рухових патернів, які потребують корекції.

Найбільш вираженим і статистично частим порушенням став глибокий нахил тулуба вперед. Під час копання, що представлено на рис. 1, спина перебувала в різних фазах згинання фактично в кожному циклі роботи. У фазі

занурення лопати кут згину тулуба наближався до критичних значень, а у фазі підймання ґрунту нахил збільшувався ще більше. Це підтверджується кількісними даними REBA: тулуб оцінено в найвищому діапазоні балів, що свідчить про надмірну компресію у поперековому відділі. Під час підйому бетонного блоку нахил не лише був глибоким, а й утримувався протягом більш тривалої фази руху. Це означає, що навантаження на диски L4–L5 та L5–S1 зростало в десятки разів порівняно з положенням у нейтральній позі. У підлітковому віці такий характер роботи створює особливо високий ризик перевантаження поперекових м'язів, формування больових синдромів і розвитку функціональних порушень постави.

Другим суттєвим ризиком є регулярна ротація шиї. Алгоритм SoterAI зафіксував, що під час копання голова багаторазово поверталась у сторони, що можна побачити на візуалізаціях у додатках. Ці рухи виникали в моменти контролю положення лопати та напрямку руху ґрунту. Основна проблема полягала в тому, що ротація супроводжувалась одночасним нахилом вперед, що формує надмірне навантаження на м'язи шиї та верхній плечовий пояс. У ситуації з перенесенням вантажу ротація голови поєднувалась з її опусканням. Така позиція характерна для ситуацій, коли людина намагається контролювати рівновагу на нерівній або слизькій поверхні. Саме це було зафіксовано в додатку Б: нестабільність опори провокувала

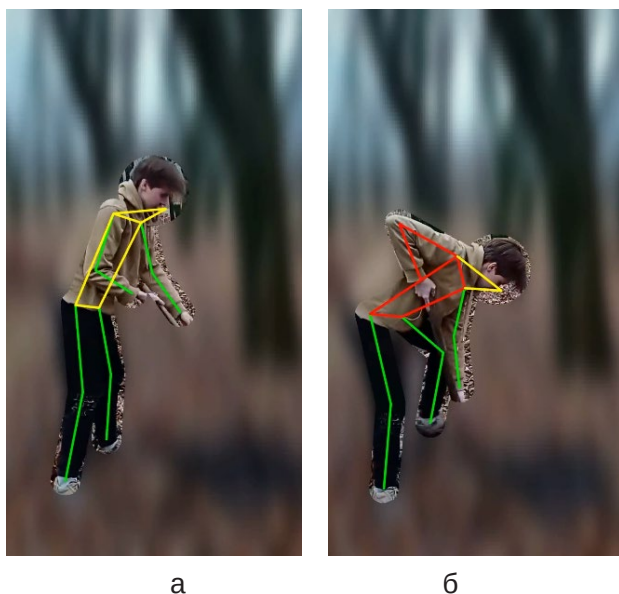


Рис. 1. Ергономічна оцінка найбільш уразливих зон тіла учня під час копання:
а – у розігнутому стані; б – у зігнутому стані



а б в

Рис. 2. Ергономічна оцінка найбільш уразливих зон тіла учня під час ручного підйому та перенесення бетонного блоку:
а – у розігнутому стані; б – у зігнутому стані;
в – під час перенесення бетонного блоку

часті мікрорухи голови, що створювало додаткове напруження шийного відділу та збільшувало ризик м'язово-тонічних реакцій.

Надзвичайно небезпечними виявились і торсійні рухи корпусу. У додатку А вони чітко видно у фазі викидання землі: тулуб виконує ротацію в бік, тоді як ноги залишаються майже нерухомими, а спина перебуває у напівзігнутій позиції. У біомеханічному контексті це є поєднанням двох факторів підвищеного ризику – згинання та ротації під навантаженням, що суттєво збільшує ризик пошкодження міжхребцевих дисків. У другому експерименті скручування корпусу відбувалися не лише в момент піднімання вантажу, а й на початку руху під час перенесення. Наявність вантажу значно підсилювала осьове навантаження, а слизький ґрунт формував ризик зміщення центру мас у бік. Саме такі поєднання є найбільш загрозливими з погляду ризику гострого травмування, особливо в зоні поперекових м'язів-стабілізаторів.

Окрему групу ризиків становили асиметричні положення тіла. На візуалізаціях звітів відмічено, що під час копання ліва та права частини тіла працювали нерівномірно: одна рука перебувала в напівзігнутому стані, тоді як інша несла основне навантаження. Система ідентифікувала нерівномірний розподіл сили, що призводить до асиметричної напруги в м'язах спини та плечей. Під час перенесення вантажу асиметрія проявлялась у тому, що тулуб дещо зміщувався у бік, протилежний вантажу, намагаючись компенсувати його вагу. Таке компенсаторне зміщення є природним, але водночас небезпечним, оскільки може формувати неправильні рухові стереотипи.

На результати значний вплив мали й зовнішні умови. Під час копання основним фактором ризику була циклічність рухів: постійне повторення тих самих помилкових поз створювало накопичувальний ефект втоми та напруги в м'язах спини. У другому експерименті центральним фактором стала слизькість та нерівність ґрунту, що потребувало постійного перерозподілу ваги та мікрокорекцій положення тіла. Алгоритм SoterAI реєстрував це як нестійкість опори, що автоматично підвищує ризик у категорії REBA.

Отримані результати підтверджують, що під час обох видів діяльності проявлялися рухи та пози, які методика REBA класифікує як високо небезпечні. Особливо критичними стали глибокі нахили понад 45°, скручування корпусу під навантаженням, ротація шиї у поєднанні з нахилом та асиметричні рухи. Оскільки всі ці порушення виникали систематично, це дає підстави

стверджувати про високий загальний ергономічний ризик і потенційну загрозу для формування правильної постави та здоров'я опорно-рухового апарату.

Оцінювання робочих поз за методикою REBA дало змогу визначити рівень ергономічного ризику та здійснити його медичну інтерпретацію з урахуванням особливостей опорно-рухового апарату підлітків. Отримані результати свідчать, що під час виконання побутових фізичних дій формуються нефізіологічні пози та рухи, які мають потенційно негативний вплив на стан здоров'я.

Під час виконання копання ґрунту та ручного піднімання й перенесення вантажу зафіксовано високий рівень ергономічної небезпеки за шкалою REBA. Основними чинниками ризику стали глибокі нахили тулуба понад 45°, ротаційні рухи шийного відділу та скручування корпусу під навантаженням. Такі пози супроводжуються значним зростанням компресійного та зсувного навантаження на міжхребцеві диски, що з медичного погляду є несприятливим для незавершено сформованого хребта підлітка.

Систематичний нахил голови вперед у поєднанні з її ротацією призводить до перенапруження м'язів шийно-комірцевої зони та порушення м'язового балансу. У клінічному аспекті це може проявлятися м'язово-тонічними реакціями, болем у шиї та головним болем напруження. Водночас глибокі нахили тулуба створюють підвищене навантаження на поперековий відділ хребта, що підвищує ризик розвитку поперекового больового синдрому та функціональних блоkad.

Особливу медичну небезпеку становлять комбіновані рухи зі згинанням і скручуванням корпусу під навантаженням. Такі рухові патерни спричиняють нерівномірний розподіл навантаження між структурами хребта та можуть призводити до мікротравматизації міжхребцевих дисків і формування асиметричного м'язового напруження. У підлітковому віці це створює передумови для раннього розвитку порушень постави та хронічного болю.

Додатковими чинниками підвищення ергономічного ризику є асиметричні пози тіла та нестабільність опорної поверхні, які викликають компенсаторні мікрорухи та перевантаження м'язів-стабілізаторів. Це знижує контроль рухів та підвищує імовірність функціональних порушень опорно-рухового апарату (табл. 1).

З позицій профілактичної медицини виявлені ергономічні ризики мають переважно функціональний характер і на ранніх етапах є зворотними. Підлітковий вік характеризується

незавершеністю формування опорно-рухового апарату, що зумовлює підвищену чутливість до механічних перевантажень. Застосування методики REBA дає можливість виявляти потенційно небезпечні рухи до появи клінічних проявів. Це підтверджує доцільність використання отриманих результатів у профілактиці м'язово-скелетних порушень.

Узагальнюючи, зазначимо, що результати оцінювання за методикою REBA підтверджують, що виявлені ергономічні ризики мають чітке медичне значення та можуть розглядатися як фактори ризику формування м'язово-скелетних порушень у підлітковому віці. Систематизований зв'язок між конкретними ергономічними ризиками, механізмами їх впливу на організм і можливими порушеннями здоров'я наведено в таблиці 1.

Профілактика та рекомендації щодо зменшення ергономічних ризиків. У процесі

експериментального дослідження встановлено, що зменшення ергономічних ризиків безпосередньо пов'язане з формуванням раціональних рухових стереотипів і безпечною організацією робочого місця. Аналіз трудових рухів, проведений із використанням системи SoterAI, показав, що найбільш небезпечними для здоров'я є надмірні нахили тулуба, ротація шийного відділу, скручування корпусу й асиметричні пози. Саме такі положення створюють підвищене навантаження на хребет і можуть призводити до м'язового перенапруження та розвитку мікротравм.

Одним із ключових чинників підвищеного ризику визначено неправильну техніку нахилів та піднімання предметів. Дані оцінки за методикою REBA засвідчили, що найвищий рівень ризику виникав під час виконання нахилів понад 45° у процесі копання (рис. 1). Застосування техніки роботи шляхом згинання в колінних

Таблиця 1

**Медико-біомеханічна характеристика ергономічних ризиків
та їх вплив на здоров'я підлітків**

Ергономічний ризик	Патофізіологічний механізм впливу	Основні анатомічні структури-мішені	Можливі функціональні порушення та клінічні стани	Довгострокові медичні ризики	Профілактичні рекомендації
Систематичний нахил голови вперед	Хронічне перенапруження м'язів-стабілізаторів, зниження регіонарного кровообігу, перевантаження міжхребцевих дисків	М'язи шийно-комірцевої зони, шийні хребці, судини	Цервікалія, головний біль напруження, скутість рухів	Формування хронічного м'язово-тонічного синдрому	Контроль положення голови, вправи на розвантаження ший, регламентовані перерви
Ротація шиї у поєднанні з нахилом	Порушення м'язового балансу та нейром'язової координації	Шийний відділ хребта, фасеткові суглоби	Функціональні больові синдроми, обмеження рухливості	Стійкі порушення рухового стереотипу	Уникнення різких рухів, стабілізація шийного відділу
Глибокі нахили тулуба понад 45°	Підвищення компресійного тиску на міжхребцеві диски, перевантаження паравертебральних м'язів	Поперековий відділ хребта, міжхребцеві диски	Поперековий біль, швидка втомлюваність м'язів	Ризик ранніх дегенеративних змін дисків	Нахили з опорою на коліна, збереження нейтрального положення спини
Скручування корпусу під навантаженням	Виникнення зсувних сил у фіброзному кільці міжхребцевих дисків	Хребет, м'язово-зв'язковий апарат	Мікротравматизація, асиметричний м'язовий тонус	Формування хронічного больового синдрому	Повороти всім тілом, уникнення торсій у попереку
Асиметричні пози тіла	Нерівномірний розподіл навантаження, компенсаторні скорочення м'язів	Хребет, плечовий пояс	Порушення постави, функціональна асиметрія	Ризик сколіотичної постави	Контроль симетрії, чергування навантаження
Нестійка або слизька опорна поверхня	Постійні коригувальні мікрорухи, перевантаження м'язів-стабілізаторів	Нижні кінцівки, хребет	М'язові спазми, порушення координації	Підвищений ризик травматизації	Забезпечення стабільної опори, відповідне взуття

суглобах, з утриманням спини в нейтральному положенні та наближенням вантажу до тіла дає можливість суттєво зменшити навантаження на поперековий відділ хребта й уникнути небезпечних ротаційних рухів.

Під час дослідження також зафіксовано часті нахили голови вниз або її повороти вбік під час виконання фізичних робіт. Поєднання нахилу та ротації, як підтвердив аналіз SoterAI, створює додаткове навантаження на шийний відділ хребта. Контроль положення голови й утримання її в нейтральній позиції без різких поворотів сприяє зменшенню втоми м'язів шиї та підвищенню загального комфорту під час виконання завдань.

Окрему увагу привертає проблема скручування корпусу. Під час викидання ґрунту часто поєднувалися нахил і ротація тулуба. Корекція техніки шляхом повороту всього тіла разом із нижніми кінцівками замість торсійних рухів у попереку дає змогу зменшити ризик перенапруження хребта та підвищити ефективність виконання роботи.

Суттєвий вплив на рівень ергономічного ризику має організація робочого місця. На другій локації дослідження нерівна та частково слизька поверхня змушувала виконувати компенсаторні рухи, часто змінювати положення ніг і постійно утримувати рівновагу, що підвищувало загальне навантаження на опорно-руховий апарат. Це підтверджує важливість попереднього огляду місця роботи, підготовки поверхні, усунення сторонніх предметів, використання взуття з належним зчепленням і забезпечення стійкої пози.

Вибір інструментів також є критичним фактором профілактики. Використання інструментів із короткою рукояткою призводить до вимушених глибоких нахилів і зростання навантаження на поперековий відділ. Застосування інструментів, що відповідають зросту виконавця, сприяє формуванню більш природних рухів і зменшенню кількості небезпечних поз.

Важливим аспектом є вплив робочої пози під час навчальної діяльності. Невідповідна висота столу або стільця сприяє формуванню сутулості та нахилу голови, що згодом закріплюється і під час фізичних навантажень. Адаптація навчального робочого місця до антропометричних особливостей дає змогу підтримувати нейтральне положення хребта та знижувати ризик розвитку порушень постави.

Узагальнення результатів дослідження свідчить, що корекція техніки рухів і раціональна організація робочого середовища є ключовими чинниками зниження ергономічних ризиків.

Аналіз рухової діяльності дає можливість виявити типові помилки й обґрунтувати ефективність навіть незначних змін у техніці виконання робіт і просторовій організації робочого місця.

На основі результатів експериментального дослідження й аналізу рухової діяльності за допомогою системи SoterAI сформульовано комплекс рекомендацій, спрямованих на зниження ергономічних ризиків та збереження здоров'я учнів і педагогічних працівників у процесі навчальної та побутової діяльності.

Важливим профілактичним чинником є раціональна організація режиму роботи. Короткі перерви тривалістю 3–5 хвилин кожні 10–15 хвилин активної діяльності сприяють зменшенню м'язової втоми, відновленню кровообігу та зниженню статичного навантаження на опорно-руховий апарат.

Ефективним способом профілактики перенапруження є чергування різних видів діяльності. Виконання одноманітних рухів протягом тривалого часу призводить до локального стомлення окремих м'язових груп. Зміна завдань забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження та знижує ризик розвитку мікротравм.

Важливу роль відіграє виконання короткої розминки перед фізичним навантаженням. Легкі вправи для м'язів спини, плечового поясу, шиї та нижніх кінцівок сприяють підготовці організму до роботи, підвищують контроль рухів і зменшують імовірність різких або неконтрольованих дій.

Підбір інструментів відповідно до зросту та фізичних можливостей учнів є ключовим елементом ергономічної профілактики. Інструменти з невідповідною довжиною або надмірною вагою змушують приймати асиметричні пози, виконувати глибокі нахили та створюють додаткове навантаження на хребет. Раціональний вибір інструментів покращує техніку рухів і зменшує ротаційні навантаження на корпус.

Аналіз робочих поз засвідчив, що найбільш поширеними помилками є глибокі нахили, значне опускання голови та скручування тулуба під час піднімання й перенесення вантажів. Дотримання нейтрального положення хребта, виконання нахилів завдяки роботі нижніх кінцівок та утримання голови без різких поворотів дає змогу зменшити навантаження на міжхребцеві диски та м'язово-зв'язковий апарат.

Особливу небезпеку становлять комбіновані рухи з одночасним нахилом і скручуванням корпусу. Повороти доцільно виконувати всім тілом із переставлянням ніг, а не шляхом торсійних рухів у поперековому відділі хребта, що суттєво знижує ризик гострого болю та м'язових спазмів.

Стан робочої поверхні також має істотне значення для безпеки. Нерівний або слизький ґрунт підвищує імовірність неконтрольованих рухів і падінь. Перед початком роботи доцільно проводити огляд місцевості, усувати небезпечні ділянки, забезпечувати достатній простір для рухів та використовувати взуття з належним зчепленням.

Для педагогічних працівників важливим є систематичне формування в учнів правильних рухових навичок. Демонстрація безпечних способів піднімання предметів, раціональна організація робочих місць з урахуванням вікових та антропометричних особливостей, а також пояснення наслідків небезпечних рухів сприяють формуванню здоров'язбережувальної поведінки та стійких навичок, що позитивно впливають на стан здоров'я впродовж життя.

Висновки. За результатами аналізу основних видів ергономічних ризиків встановлено, що під час навчальної та побутової фізичної діяльності учнів найбільш поширеними є тривалі нефізіологічні пози, глибокі нахили тулуба, ротація голови та скручування корпусу, а також статичні навантаження. Визначено, що зазначені чинники мають системний характер та формуються внаслідок закріплення неправильних рухових стереотипів у підлітковому віці, що підтверджує актуальність медико-ергономічного підходу до їх оцінювання.

Під час дослідження біомеханічних особливостей робочих поз із використанням комп'ютерного зору та методики REBA

проведено кількісну оцінку положень тіла під час виконання типових фізичних дій. Встановлено, що надмірні нахили тулуба понад 45°, нефізіологічні положення голови та ротаційні рухи корпусу під навантаженням відповідають високому рівню ергономічного ризику за шкалою REBA, що свідчить про значну ймовірність негативного впливу на опорно-руховий апарат.

Оцінка потенційного впливу виявлених ергономічних порушень з позицій медицини показала, що регулярне виконання нефізіологічних рухів і поз призводить до перевантаження шийного та поперекового відділів хребта, порушення м'язового балансу і створює передумови для розвитку функціонального болю та м'язово-скелетних розладів. Отримані результати підтверджують, що ергономічні ризики у школярів слід розглядати як чинник довготривалого впливу на стан здоров'я.

За результатами дослідження розроблено практичні рекомендації профілактичного спрямування, спрямовані на зменшення ергономічних ризиків, зокрема корекцію техніки рухів, використання нейтральних поз, уникнення комбінованих рухів із нахилом і скручуванням, раціональну організацію робочого середовища, впровадження коротких перерв, розминки та чергування видів діяльності. Запропоновані рекомендації мають прикладне значення та можуть бути використані в освітніх закладах і домашніх умовах для профілактики м'язово-скелетних порушень у школярів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кашуба В. О., Пападюха Ю. А. Біомеханіка просторової організації тіла людини: сучасні методи та засоби діагностики і відновлення порушень : монографія. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 768 с.
2. da Costa L., Lemes I. R., Tebar W. R., Oliveira C. B., Guerra P. H., Soidán J. L. G., et al. Sedentary behavior is associated with musculoskeletal pain in adolescents: a cross sectional study. *Brazilian journal of physical therapy*. 2022. P. 100452. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2022.100452>
3. Loef B., van Oostrom S. H., Bosma E., Proper K. I. The mediating role of physical activity and sedentary behavior in the association between working from home and musculoskeletal pain during the COVID-19 pandemic. *Frontiers in public health*. 2022. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1072030>
4. Agostinelli T., Generosi A., Ceccacci S., Mengoni M. Validation of computer vision-based ergonomic risk assessment tools for real manufacturing environments. *Scientific reports*. 2024. Vol. 14, no. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79373-4>
5. Woods A. J., Norman J., Ryan S. T., Wardle K., Probst Y. C., Crowe R. K., et al. Children's physical activity and sedentary behaviour in before school care: an observational study. *Preventive medicine*. 2023. P. 107810. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2023.107810>
6. Banadaki F. D., Rahimian B., Moraveji F., Varmazyar S. The impact of smartphone use duration and posture on the prevalence of hand pain among college students. 2024. Vol. 25, no. 1. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07685-7>
7. Lee I. G., Son S. J. Effects of smartphone use on posture and gait: a narrative review. *Applied sciences*. 2025. Vol. 15, no. 12. P. 6770. <https://doi.org/10.3390/app15126770>
8. Kim H.-K., Zhang Y. Estimation of lumbar spinal loading and trunk muscle forces during asymmetric lifting tasks: application of whole-body musculoskeletal modelling in OpenSim. *Ergonomics*. 2016. Vol. 60, no. 4. P. 563–576. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1191679>

9. Marras, W. S., Davis, K. G., Kirking, B. C., & Granata, K. P. Spine loading and trunk kinematics during team lifting. *Ergonomics*. 1999. Vol. 42, no. 10. P. 1258–1273. <https://doi.org/10.1080/001401399184938>
10. Davis K. G. Estimation of spinal loading during palletizing under restricted height and poor lighting. *Ergonomics international journal*. 2020. Vol. 4, no. 5. <https://doi.org/10.23880/eoj-16000258>
11. Castellucci H. I., Arezes P. M., Viviani C. A. Mismatch between classroom furniture and anthropometric measures in Chilean schools. *Applied Ergonomics*. 2010. Vol. 41, no. 4. P. 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.12.001>
12. Kaya N. A., Erkarlan Ö. Sinif mobilyalari ve öğrenci vücut ölçüleri arasindaki uyumsuzluk: izmir örneği. *Ergonomi*. 2019. Vol. 2, no. 3. P. 5–6. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.598932>
13. Uhlig S. E., Marchesi L. M., Duarte H., Araújo M. T. M. Association between respiratory and postural adaptations and self-perception of school-aged children with mouth breathing in relation to their quality of life. *Brazilian journal of physical therapy*. 2015. Vol. 19, no. 3. P. 201–210. <https://doi.org/10.1590/bjpt-rbf.2014.0087>
14. Zain I., Nawawi R., Ismail I. F., Zain N. M. Exploring risk of posture and musculoskeletal disorders among smartphone addicted youth: a protocol paper. *International journal of occupational safety and health*. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 30–36. <https://doi.org/10.3126/ijosh.v14i1.50072>
15. Guirado T., Chambonnière C., Chaput J.-P., Metz L., Thivel D., Duclos M. Effects of classroom active desks on children and adolescents' physical activity, sedentary behavior, academic achievements and overall health: a systematic review. *International journal of environmental research and public health*. 2021. Vol. 18, no. 6. P. 2828. <https://doi.org/10.3390/ijerph18062828>
16. Dinkelspiel Ekman S., Nair M., Gredin N. V., Lindgren E.-C. Reducing classroom sedentary behaviour: a scoping review of interventions and student involvement. *Health promotion international*. 2025. Vol. 40, no. 5. <https://doi.org/10.1093/heapro/daaf167>
17. Nadeem M., Elbasi E., Zreikat A. I., Sharsheer M. Sitting posture recognition systems: comprehensive literature review and analysis. *Applied sciences*. 2024. Vol. 14, no. 18. P. 8557. <https://doi.org/10.3390/app14188557>
18. Deshpande U. U., Araujo S. D. C. S., Deshpande S., Kangralkar V., Patil R., Chate R. A. A., Birajdar P., Singadi S., Raikar P., Arjunwadkar S. A review of machine learning techniques for ergonomic risk assessment based on human pose estimation. *Discover artificial intelligence*. 2025. Vol. 5, no. 1. <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00566-5>
19. Fan C., Mei Q., Yang Q., Li X. Computer-vision based rapid entire body analysis (REBA) estimation / C. Fan et al. *Modular and offsite construction (MOC) summit proceedings*. 2022. P. 90–97. <https://doi.org/10.29173/mocs269>
20. Цимбал Б. М., Свіржевський П. В. Дослідження ергономічних ризиків саперів за допомогою штучного інтелекту. *Штучний інтелект у правовій практиці: межі та можливості* : зб. тез круглого столу, м. Львів (14 березня 2025 року). Львів : ЛДУМВС, 2025. С. 221–223. URL: <https://surl.li/hdxujd> (дата звернення: 04.11.2025).
21. Цимбал Б. Дослідження ергономічних ризиків під час виконання аварійно-рятувальних робіт. *Journal of scientific papers "Social development and security"*. 2025. Т. 15, № 1. С. 271–285. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.24>
22. Хоружий О., Цимбал Б. М. Дослідження ергономічних ризиків рятувальників під час навчання. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності : матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів, 2025. С. 571–573. URL: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/2517> (дата звернення: 06.11.2025).
23. Ткачишин В. С. Професійні захворювання опорно-рухового апарату та прилеглих структур, спричинені впливом ряду шкідливих виробничих факторів. лекція 6. фізичні, хімічні та біологічні фактори у процесі виробничої діяльності. *Український ревматологічний журнал*. 2006. Т. 2, № 24. С. 25–29. URL: <https://www.rheumatology.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/magazine/24/367.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
24. Повшенюк А. В., Шінкарук-Диковицька М. М., Павлюк Д. Д. Поширеність порушень опорно-рухової та нервової системи у лікарів-стоматологів. *Вісник Вінницького національного медичного університету*. 2024. Т. 28, № 1. С. 109–112. [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2024-28\(1\)-19](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2024-28(1)-19)
25. Починок Є. А. Ергономічні умови створення безпечного освітнього середовища початкової школи як чинник протидії булінгу. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах*. 2020. Т. 3, № 70. С. 98–103. <https://doi.org/10.32840/1992-5786.2020.70-3.18>
26. Cheberiachko S., Deriuhin O., Tretiak O., Mukha O. Оцінка ергономічних ризиків здоров'ю робітників автосервісу. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2020. Т. 2, № 15. С. 155–164. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.403>
27. SoterAI – Leading AI tool for workplace safety. SoterAI. URL: <https://ai.soter.com/auth/sign-in> (date of access: 04.11.2025).

REFERENCES:

1. Kashuba, V. O., & Papadiukha, Yu. A. (2018). Biomechanika prostorovoi orhanizatsii tila liudyny: suchasni metody ta zasoby diahnostryky i vidnovlennia poshkodzhenn [Biomechanics of the spatial organization of the human body: modern methods and means of diagnosing and restoring disorders]. Kyiv: Tsentru uchbovoi literatury [in Ukrainian].
2. da Costa, L., Lemes, I. R., Tebar, W. R., Oliveira, C. B., Guerra, P. H., Soidán, J. L. G., Mota, J., & Christofaro, D. G. D. (2022). Sedentary behavior is associated with musculoskeletal pain in adolescents: a cross sectional study. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2022.100452>.
3. Loef, B., van Oostrom, S.H., Bosma, E., & Proper, K. I. (2022). The mediating role of physical activity and sedentary behavior in the association between working from home and musculoskeletal pain during the COVID-19 pandemic. *Frontiers in Public Health*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1072030>.
4. Agostinelli, T., Generosi, A., Ceccacci, S., & Mengoni, M. (2024). Validation of computer vision-based ergonomic risk assessment tools for real manufacturing environments. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79373-4>.
5. Woods, A. J., Norman, J., Ryan, S. T., Wardle, K., Probst, Y. C., Crowe, R. K., Patel, L., Hammersley, M. L., Furber, S., Stanley, R. M., Taylor, L., & Okely, A. D. (2023). Children's physical activity and sedentary behaviour in before school care: An observational study. *Preventive Medicine*, 107810. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2023.107810>.
6. Banadaki, F. D., Rahimian, B., Moraveji, F., & Varmazyar, S. (2024). The impact of smartphone use duration and posture on the prevalence of hand pain among college students. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 25 (1). <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07685-7>.
7. Lee, I. G., Son, S. J. (2025). Effects of smartphone use on posture and gait: A narrative review. *Applied Sciences*, 15 (12), 6770. <https://doi.org/10.3390/app15126770>.
8. Kim, H.-K., Zhang, Y. (2016). Estimation of lumbar spinal loading and trunk muscle forces during asymmetric lifting tasks: Application of whole-body musculoskeletal modelling in OpenSim. *Ergonomics*, 60(4), 563–576. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1191679>.
9. Marras, W. S., Davis, K. G., Kirking, B. C., & Granata, K. P. (1999). *Spine loading and trunk kinematics during team lifting*. *Ergonomics*, 42(10), 1258–1273. <https://doi.org/10.1080/001401399184938>.
10. Davis, K. G. (2020). Estimation of spinal loading during palletizing under restricted height and poor lighting. *Ergonomics International Journal*, 4(5). <https://doi.org/10.23880/eoij-16000258>.
11. Castellucci, H. I., Arezes, P. M., & Viviani, C. A. (2010). Mismatch between classroom furniture and anthropometric measures in Chilean schools. *Applied Ergonomics*, 41(4), 563–568. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.12.001>.
12. Kaya, N. A., Erkarıslan, Ö. (2019). Sinif mobilyalari ve öğrenci vücut ölçüleri arasindaki uyumsuzluk: İzmir örneği. *Ergonomi*, 2(3), 5–6. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.598932>.
13. Uhlig, S. E., Marchesi, L. M., Duarte, H., & Araújo, M. T. M. (2015). Association between respiratory and postural adaptations and self-perception of school-aged children with mouth breathing in relation to their quality of life. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 19(3), 201–210. <https://doi.org/10.1590/bjpt-rbf.2014.0087>.
14. Zain, I., Nawawi, R., Ismail, I. F., & Zain, N. M. (2024). Exploring risk of posture and musculoskeletal disorders among smartphone addicted youth: A protocol paper. *International Journal of Occupational Safety and Health*, 14(1), 30–36. <https://doi.org/10.3126/ijosh.v14i1.50072>.
15. Guirado, T., Chambonnière, C., Chaput, J.-P., Metz, L., Thivel, D., & Duclos, M. (2021). Effects of classroom active desks on children and adolescents' physical activity, sedentary behavior, academic achievements and overall health: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 2828. <https://doi.org/10.3390/ijerph18062828>.
16. Dinkelspiel Ekman, S., Nair, M., Gredin, N. V., & Lindgren, E.-C. (2025). Reducing classroom sedentary behaviour: A scoping review of interventions and student involvement. *Health Promotion International*, 40(5). <https://doi.org/10.1093/heapro/daaf167>.
17. Nadeem, M., Elbasi, E., Zreikat, A. I., & Sharsheer, M. (2024). Sitting posture recognition systems: Comprehensive literature review and analysis. *Applied Sciences*, 14(18), 8557. <https://doi.org/10.3390/app14188557>.
18. Deshpande, U. U., Araujo, S. D. C. S., Deshpande, S., Kangralkar, V., Patil, R., Chate, R. A. A., Birajdar, P., Singadi, S., Raikar, P., & Arjunwadkar, S. (2025). A review of machine learning techniques for ergonomic risk assessment based on human pose estimation. *Discover Artificial Intelligence*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00566-5>.

19. Fan, C., Mei, Q., Yang, Q., & Li, X. (2022). Computer-vision based rapid entire body analysis (REBA) estimation. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, 90–97. <https://doi.org/10.29173/mocs269>.
20. Svirzhevskiy, P. V., Tsymbal, B. M. (2025). Doslidzhennia erhonomichnykh ryzykiv saperiv za dopomohoiu shtuchnoho intelektu [Research into ergonomic risks of sappers using artificial intelligence]. In *Shtuchnyi intelekt u pravovii praktytsi: Mezhi ta mozhlyvosti*. (pp. 221–223). Lviv : LDUMVS Retrieved from <https://surl.li/hdxujd> [in Ukrainian].
21. Tsymbal, B. (2025). Doslidzhennia erhonomichnykh ryzykiv pid chas vykonannia avariino-riatuvalnykh robit [Research into ergonomic risks during emergency and rescue operations]. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, 15(1), 271–285. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.1.24> [in Ukrainian].
22. Khoruzhyi, O., Tsymbal, B. M. (2025). Doslidzhennia erhonomichnykh ryzykiv riatuvalnykh pid chas navchannia [Research on ergonomic risks of rescuers during training]. In *Problemy ta perspektyvy rozvytku systemy bezpeky zhyttiedialnosti*. 571–573. Retrieved from <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/2517> [in Ukrainian].
23. Tkachyshyn, V. S. (2006). Profesiini zakhvoriuvannia oporno-rukhovoho aparatu ta prylehlykh struktur, sprychyneni vplyvom riadu shkidlyvykh vyrobnychych faktoriv. Lektsiia 6. fizychni, khimichni ta biolohichni faktory u protsesi vyrobnychoi diialnosti [Occupational diseases of the musculoskeletal system and adjacent structures caused by the influence of a number of harmful production factors. Lecture 6. Physical, chemical and biological factors in the process of production activities]. *Ukrainskyi revmatolohichnyi zhurnal*, 6(24), 25–29. Retrieved from <https://www.rheumatology.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/magazine/24/367.pdf> [in Ukrainian].
24. Povsheniuk, A. V., Shinkaruk-Dykovytska, M. M., & Pavliuk, D. D. (2024). Prevalence of musculoskeletal and nervous system disorders among dentists [Prevalence of musculoskeletal and nervous system disorders in dentists]. *Reports of Vinnytsia National Medical University*, 28(1), 109–112. [https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2024-28\(1\)-19](https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2024-28(1)-19) [in Ukrainian].
25. Pochynok, Y. (2020). Ergonomic conditions for creating a safe educational environment in primary school as a factor in combating bullying [Ergonomic conditions for creating a safe educational environment in primary school as a factor in combating bullying]. *Pedagogy of the Formation of a Creative Person in Higher and Secondary Schools*, 3(70), 98–103. <https://doi.org/10.32840/1992-5786.2020.70-3.18> [in Ukrainian].
26. Cheberiachko, S., Deriuhin, O., Tretiak, O., & Mukha, O. (2020). Otsinka erhonomichnykh ryzykiv zdoroviu robitnykiv avtoservisu [Assessment of ergonomic health risks for car service workers]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 2(15), 155–164. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.403> [in Ukrainian].
27. SoterAI – Leading AI tool for workplace safety (n.d.). SoterAI. Retrieved from <https://ai.soter.com/auth/sign-in>.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 08.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 331.45:005.334:005.96

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-31>**АНАЛІЗ РІВНІВ ІЄРАРХІЇ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ В ОРГАНІЗАЦІЯХ****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

БількоТамара Олександрівна,

кандидат біологічних наук, доцент
доцент кафедри охорони праці та біотехнологічних систем у тваринництві
Національного університету біоресурсів і природокористування України
ORCID ID: 0000-0003-3164-3298

Володченкова Наталія Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,
декан гірничо-металургійного факультету,
доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0003-4617-7285

Мета провести комплексний аналіз і взаємозв'язку державного, корпоративного і індивідуального рівнів безпеки в організації.

Застосовувався метод системного аналізу для визначення ролі держави у встановленні вимог з безпеки праці та механізмів примусу до їх виконання, які є рушійною силою для дій на корпоративному та індивідуальному рівнях

Проведено комплексний аналіз взаємозв'язку державного, корпоративного і індивідуального рівнів безпеки в організації, що дозволив встановити, що дієвість системи управління безпекою праці досягається лише завдяки синергетичному ефекту зазначених рівнів. Синергетичний ефект полягає у перегляді нормативно-правової бази з метою її консолідації, усунення застарілих та суперечливих норм, та гармонізації її з сучасними, ризик-орієнтованими підходами на державному рівні; забезпечення лідерства, прихильності до безпеки, виділення необхідних ресурсів для розвитку культури безпеки працівників на корпоративному рівні та сприянні проактивної участі працівника у всіх питаннях безпеки на індивідуальному рівні. Встановлено, до сприятливих чинників системи управління безпекою праці та здоров'я працівників відносять гармонізацію з нормами ЄС, поширення стандарту ISO 45001:2018, технологічний розвиток, що разом із переходом від базової, орієнтованої на відповідність законодавству системи управління безпекою праці та здоров'ям працівників до динамічної, інтегрованої згідно вимог ISO 45001:2018 є не просто технічним оновленням, а фундаментальною зміною корпоративної філософії управління. Показано, що на рішення та поведінку працівника впливає рівень культури безпеки, який повинен забезпечити гармонічний розвиток п'яти складових інформована культура, культури звітності (Reporting Culture), справедливої культури відповідальності (Just Culture), гнучкої культури до змін та культура навчання (Learning Culture).

Наукова новизна полягає у системному підході до аналізу безпеки праці, який розглядає її не як набір окремих правил, а як взаємопов'язану систему з трьома рівнями: державним, корпоративним та індивідуальним, що дозволяє зробити висновок – дієвість системи досягається лише завдяки синергетичному ефекту, тобто спільним, узгодженим діям на всіх трьох рівнях

Практична цінність полягає у розробці рекомендацій для підвищення дієвості всієї ієрархії безпеки праці, що передбачає перехід до ризик-орієнтованого нагляду та зміщенню фокусу від інспекційної діяльності з перевірки формальної відповідності всім вимогам на оцінку дієвості системи управління безпекою праці.

Ключові слова: Ризик, рівні безпеки, ієрархія, культура безпеки, дієвість системи управління, безпека праці, здоров'я працівників.

Tsopa Vitaly, Cheberyachko Serhiy, Bilko Tamara, Volodchenkova Nataliia. Analysis of the hierarchical levels of occupational safety in organizations

Purpose. This study aims to conduct a comprehensive analysis of the interrelation between the state, corporate, and individual levels of occupational safety within organizations.

Methods. A systems analysis approach was employed to determine the role of the state in establishing occupational safety requirements and enforcement mechanisms, which serve as a driving force for actions at both the corporate and individual levels.

Results. The study presents a thorough examination of the interdependencies between the state, corporate, and individual levels of occupational safety management. It is demonstrated that the effectiveness of an occupational health and safety (OHS) management system can be achieved only through the synergistic interaction of these three levels. This synergy is reflected in the revision and consolidation of regulatory frameworks at the state level, including the removal of outdated and contradictory norms and alignment with modern risk-oriented approaches; the demonstration of leadership, commitment to safety, and allocation of necessary resources to foster a culture of safety at the corporate level; and the promotion of proactive employee engagement in all safety-related matters at the individual level.

The study identifies key enabling factors for a robust OHS management system, such as harmonization with EU regulations, the proliferation of ISO 45001:2018 standards, and ongoing technological development. The transition from a compliance-driven model of occupational safety to a dynamic, ISO 45001-integrated system represents not merely a technical update, but a fundamental shift in corporate safety philosophy. It is shown that employee decisions and behavior are influenced by the level of safety culture, which must ensure the balanced development of five key components: informed culture, reporting culture, just culture, flexible culture, and learning culture.

Scientific Novelty. The novelty of this research lies in its systemic approach to occupational safety, which is conceptualized not as a collection of isolated regulations, but as an interrelated hierarchy encompassing state, corporate, and individual levels. This perspective substantiates the conclusion that only coordinated and coherent actions across all three levels can ensure an effective OHS management system.

Practical Value. The practical significance of the study is reflected in the development of recommendations for enhancing the effectiveness of the entire occupational safety hierarchy. These recommendations support a shift toward risk-based supervision, moving away from formal inspection checklists to focus on evaluating the functional performance of safety management systems.

Key words: risk, safety levels, hierarchy, safety culture, management system effectiveness, occupational safety, workers' health.

Вступ. Україна володіє розгалуженою та всеосяжною законодавчою та нормативно-правовою базою з охорони праці, яка встановлює чіткі вимоги до всіх суб'єктів господарювання. Однак дієвість цієї системи часто нівелюється значним розривом між формальним дотриманням законодавчих норм та реальною культурою безпеки працівників на робочих місцях. Так, на рівні Державної політики, що історично спирається на наглядово-каральний підхід, створюються стимули для уникнення санкцій, а не для проактивного вдосконалення умов праці [1]. На корпоративному рівні система управління охороною праці виступає критично важливим механізмом, що перетворює державні вимоги на конкретні безпечні заходи [2]. Впровадження вимог міжнародних стандартів, зокрема ISO 45001:2018, демонструє потенціал для переходу від моделі простої відповідності до динамічної, ризик-орієнтованої системи, де безпека інтегрована в основні бізнес-процеси та підтримується на рівні вищого керівництва [3]. Проте, вибір підприємствами менш дієвих, але дешевших заходів керування ризиками (наприклад, перевага засобів індивідуального захисту над інженерними рішеннями) часто свідчить про те, що безпека все ще розглядається як центр витрат, а не як стратегічна інвестиція.

На рівні працівника, незважаючи на законодавчо закріплені його обов'язки, відбувається, в першу чергу, відображення в його діях корпоративної культури та результативності системи управління охороною праці [4]. Статистичні дані, що вказують на переважну частку організаційних причин у структурі виробничого травматизму (72%). Тобто працівники порушують правила безпеки [5]. Разом з тим, покладання відповідальності виключно на «людський чинник» є хибним підходом, який маскує глибинні системні недоліки.

Для забезпечення системного зсуву реактивної парадигми в безпеці праці для переходу до проактивного підходу з керування ризиками в системах управління безпекою праці та здоров'я працівників (СУ БПіЗП) [6]. Це вимагає скоординованих зусиль на всіх трьох рівнях (рис. 1).

Лише так можливо подолати розрив між формальними вимогами та реальною безпекою, забезпечуючи збереження життя та здоров'я працівників. Однак, першим кроком, для реалізації зазначеного зсуву парадигми є проведення комплексного аналізу із визначення взаємозв'язку державного, корпоративного і індивідуального рівнів безпеки в організації з метою виявлення єдиного

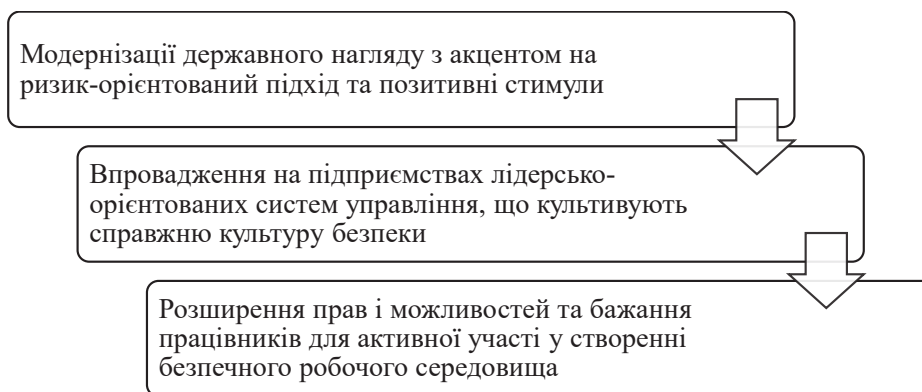


Рис. 1. Скоординовані дії на державному, корпоративному та індивідуальному рівнях у системі управління безпекою праці

інформаційного ланцюга для проведення результативного управління БПіЗП в організаціях.

Аналіз причин виробничого травматизму в Україні надає переконливі докази того, що більшість нещасних випадків не є наслідком суто технічних несправностей або випадкових збігів обставин. Дослідження показують таку структуру причин: 1 місце – організаційні причини – 72%; 2 місце – технічні причини – 19%; 3 місце – психофізіологічні причини – 9% [5, 7]. Переважна частка організаційних причин (недоліки в навчанні, погана організація робіт, недостатній нагляд, недосконалість технологічних процесів, недієва система управління БПіЗП) свідчить про те, що корінь проблеми лежить на рівні підприємства та його СУ БПіЗП. Звинувачення в інциденті виключно працівника та його «людського чиннику» (наприклад, неуважність, втома) часто є поверхневим аналізом, який ігнорує глибинні умови, що зробили цю помилку можливою або навіть імовірною [4]. Саме низький рівень культури безпеки є тим системним чинником, що породжує високий рівень травматизму [8]. Якщо в організації толерується поспіх, ігнорування вимог БПіЗП заради виконання плану, а керівництво не демонструє прихильності до охорони праці, то навіть найдосвідченіший працівник рано чи пізно може припуститися помилки [9]. Звідси індивідуальна поведінка працівника є не стільки першопричиною, скільки індикатором стану всієї системи [7, 10]. Зріла система БПіЗП не шукає винних, а аналізує, чому система дозволила статися невідповідності чи інциденту. Вона створює багатошаровий захист («швейцарський сир»), де помилка однієї людини або збій одного елемента системи перехоплюється іншими захисними бар'єрами [11].

Зрештою, сильна організаційна культура безпеки праці функціонує як децентралізована, самокоригуюча система контролю, яка є набагато стійкішою, ніж суто ієрархічна, заснована на вимогах [9]. У такій культурі безпеки працівники, наділені повноваженнями та відповідальністю, стають активними агентами безпеки праці. Вони зупиняють небезпечну роботу, вказують колегам на не виконання вимог БПіЗП та пропонують поліпшення СУ БПіЗП. Це створює тисячі щоденних мікро втручань, які запобігають настанню невідповідностей задовго до того, як їх міг би виявити формальний аудит чи перевірка керівництва [12]. Це і є кінцевою метою зрілої СУ БПіЗП, яка потребує повну інтеграцію державного, корпоративного та індивідуального рівнів.

Мета роботи полягає у проведенні комплексного аналізу і взаємозв'язку державного, корпоративного і індивідуального рівнів безпеки в організації.

Методи та методики дослідження. Дослідження структуровано за трьома взаємопов'язаними рівнями системи управління охороною праці (державний, корпоративний, індивідуальний) [13]. Також проаналізовано структуру та мету законодавства у сфері БПіЗП, щодо функціонування системи управління охороною праці, заходів із зниження ризиків та формування культури безпеки. На основі проведеного аналізу трьох рівнів безпеки СУ БПіЗП, планується виявлення сильних, слабких сторін та можливостей, які дозволять запропонувати рекомендації, спрямовані на побудову цілісної, проактивної та дієвої моделі безпеки праці в організаціях.

Фундаментом усієї системи БПіЗП в Україні є гарантія, закріплена у статті 43 Конституції України, яка проголошує право кожного на належні, безпечні і здорові умови праці [14]. Ця

норма є правовою основою найвищого рівня, що визначає пріоритетність життя та здоров'я працівників і покладає на державу обов'язок створювати відповідне законодавче поле. З неї формується центральний нормативно-правовим акт, що деталізує цю конституційну норму, є Закон України «Про охорону праці» [15]. Його ключові положення формують три рівні СУ БПіЗП (рис. 2):

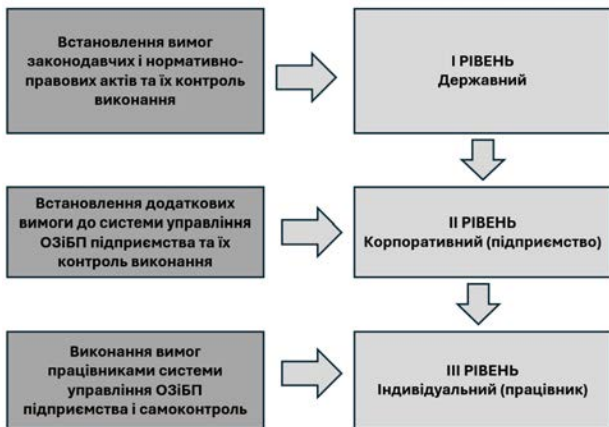


Рис. 2. Рівні систем управління БПіЗП

I рівень – державний – формує вимоги на основі законодавчої та нормативно-правової бази серед яких пріоритет життя і здоров'я працівників по відношенню до результатів виробничої діяльності та повна відповідальність роботодавця за створення належних, безпечних і здорових умов праці (стаття 4 ЗУ про охорону праці);

II рівень – корпоративний (підприємства, роботодавця) до вимог законодавчої та нормативно-правової бази додаються вимоги, встановлені підприємством, які трансформуються в практичні заходи (стаття 13 ЗУ про охорону праці), які реалізуються створеною системою управління охороною праці;

III рівень – працівника (індивідуальний) охоплює відповідальність і поведінку кожного працівника по виконанню вимог згідно цих заходів, зокрема працівник зобов'язаний дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку оточуючих, знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів (стаття 14 ЗУ про охорону праці).

Результати та дискусії. Дієвість СУ БПіЗП не може бути досягнута шляхом оптимізації лише одного із зазначених рівнів. Держава, підприємство (роботодавець) та працівник утворюють єдину систему, де кожен рівень впливає на інші (рис. 3). При цьому може бути забезпечена *позитивна їх синергія*:

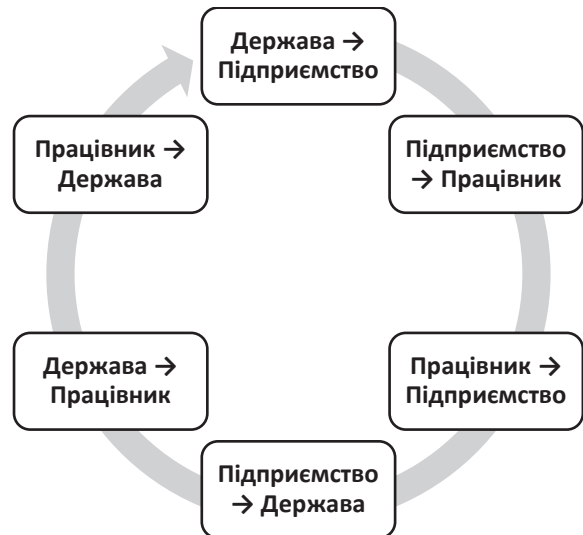


Рис. 3. Взаємодія суб'єктів безпеки праці для досягнення синергії

Держава → Підприємство: чітке, зрозуміле та послідовно застосовуване *державного* регулювання, що створює правовий та економічний тиск для мотивації підприємства інвестувати у розробку та впровадження дієвих СУ БПіЗП;

Підприємство → Працівник: якісна СУ БПіЗП створює необхідні умови (навчання, обладнання, процедури, позитивна культура безпеки), які дозволяють *працівникам* виконувати свою роботу безпечно;

Працівник → Підприємство: залучені та відповідальні *працівники* надають керівництву підприємства критично важливий зворотний зв'язок (повідомлення про небезпеки, інциденти, ризики "майже нещасні випадки"), що дозволяє СУ БПіЗП навчатися, адаптуватися та постійно поліпшуватись;

Підприємство → Держава: агреговані статистичні дані про дієвість СУ БПіЗП, рівень травматизму та нові небезпеки та їх ризики на рівні *підприємств* повинні слугувати основою для перегляду та вдосконалення вимог *державного регулювання*;

Держава → Працівник: чітке, зрозуміле та послідовно застосовуване *державне регулювання* створює правовий та економічний тиск на *працівників*, щодо мотивування *виконувати законодавчі і нормативно-правові вимоги*;

Працівник → Держава: працівники можуть звертатися до державних органів з скаргами на умови організації і забезпечення безпечної роботи працівників.

Існує і негативна синергія трьох рівнів безпеки (ланцюг відмов), яка полягає у тому що виявлена *слабкість* (недолік, виклик) на будь-якому рівні неминуче відобразиться на всій

системі разом. Наприклад, слабкий державний нагляд та корупція дозволяють підприємствам ігнорувати вимоги та формально підходити до створення СУ БПіЗП. Або недієва СУ БПіЗП призводить до недостатнього навчання, забезпечення неякісними ЗІЗ та формування культури нехтування безпекою. В таких умовах від працівника неможливо вимагати безпечної поведінки, і коли стається нещасний випадок, відповідальність часто несправедливо покладається на самого працівника, хоча першопричина лежить на керівництві підприємства.

Для ілюстрації того, як державна регуляторна рамка працює на практиці, розглянемо конкретний шкідливий виробничий чинник – промисловий шум. Основним нормативним документом, що регулює цей аспект, є ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [16]. Ці норми є обов'язковими для всіх підприємств, установ та організацій незалежно від форми власності, а також для громадян, які проектують, виготовляють та експлуатують обладнання, що є джерелом шуму.

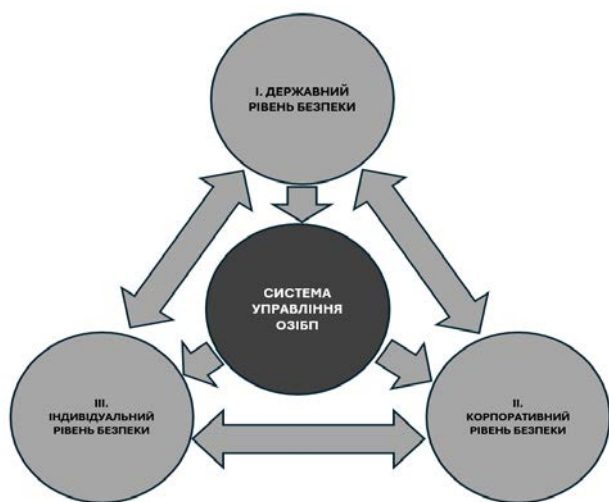


Рис. 4. Взаєв'язок рівнів безпеки: державний, корпоративний (організація, підприємство) і працівник (індивідуальний)

Держава встановлює чіткі, кількісно вимірювані гранично допустимі рівні (ГДР) шуму для різних типів робочих місць та видів робіт. Наприклад:

- Для більшості виробничих приміщень та робочих місць еквівалентний рівень шуму за 8-годинний робочий день не повинен перевищувати 80-85 дБА.

- Для робіт, що вимагають високої точності, зосередженості та підвищеної уваги (наприклад, у лабораторіях, конструкторських бюро),

допустимий рівень шуму значно нижчий і становить 50-60 дБА.

Норми також регламентують процедуру вимірювань. Вимірювання рівня шуму повинні проводитися за допомогою спеціальних приладів – шумомірів, які пройшли державну перевірку. Вимірювання проводяться в різних точках робочої зони, зазвичай на висоті 1,2...1,5 м від підлоги, щоб отримати об'єктивну картину акустичного середовища, в якому перебуває працівник [16].

З часом регулювання вдосконалюється. Наприклад, новіші нормативні акти, гармонізовані з європейськими директивами, вводять поняття граничних значень експозиції, таких як денний рівень шумового впливу (LEX, 8 год). Наприклад, встановлюється граничне значення експозиції LEX, 8 год = 87 дБА, яке не може бути перевищене за жодних обставин. Важливо, що при порівнянні фактичного рівня шуму з цим граничним значенням враховується ефект послаблення звуку засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), які носить працівник. Водночас, для визначення «робочих значень експозиції» (наприклад, верхнє значення 85 дБА та нижнє 80 дБА), які є тригерами для впровадження певних заходів захисту, ефект ЗІЗ не враховується [17]. Це стимулює роботодавців впроваджувати в першу чергу колективні та технічні заходи захисту, а не покладатися виключно на ЗІЗ. Цей приклад демонструє глибину та деталізацію державного регулювання, яке не просто декларує необхідність захисту, а встановлює конкретні числові критерії, методики вимірювань та правила оцінки, залишаючи підприємству завдання знайти технічні та організаційні рішення для досягнення відповідності цим нормам.

Сама СУ БПіЗП, яка є складною ієрархічною системою (складається також з декількох рівнів) характеризується як сприятливими так і негативними чинниками. Зокрема до сприятливих можна віднести (рис. 5).

До зовнішніх небезпечних драйверів трансформації систем управління безпекою праці можна віднести (рис. 6).

Зауважимо, що на вітчизняних підприємствах зараз діють дві різні СУ БПіЗП. Перша – у відповідності до вимог статті 13 ЗУ «Про охорону праці» та «Рекомендацій щодо побудови, впровадження та удосконалення системи управління охороною праці», затверджених наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 22.02.2008 року №35, яка зобов'язує кожного роботодавця створити та забезпечити функціонування системи управління охороною праці. Друга – у відповідності до вимог міжнародного

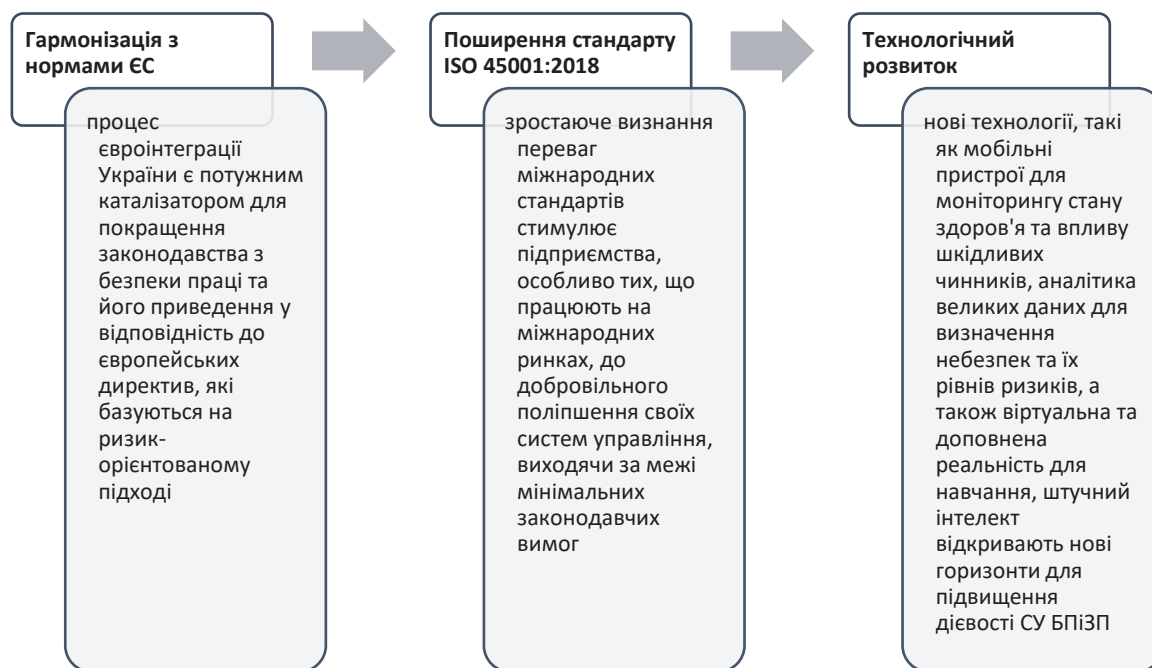


Рис. 5. Зовнішні сприятливі драйвери трансформації систем управління безпекою праці

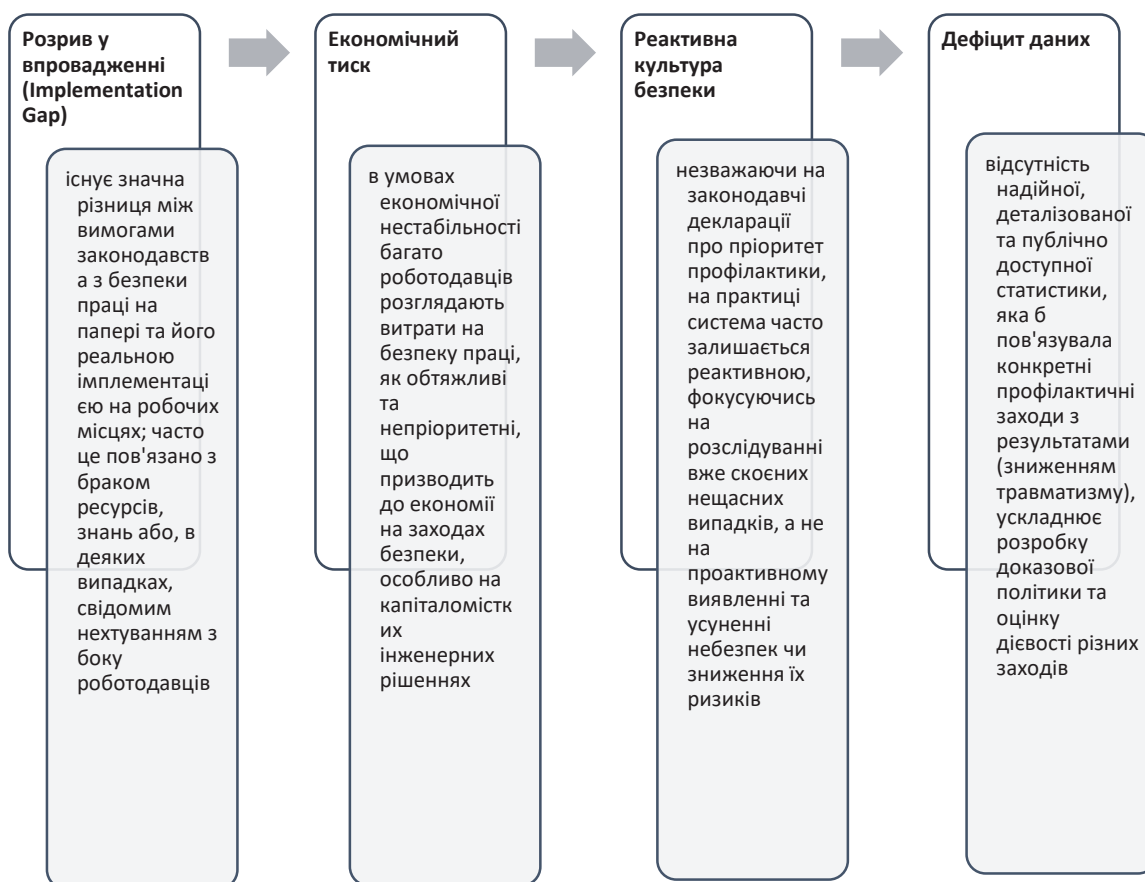


Рис. 6. Зовнішні небезпечні драйвери трансформації систем управління безпекою праці

стандарту ISO 45001:2018 «Системи менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці. Вимоги і настанови», що базується на процесно- і ризико- орієнтованій та інтегрованій моделі, яка може бути застосована в будь-якій організації, незалежно від її розміру, галузі чи географічного розташування [18].

Перехід від базової, орієнтованої на відповідність законодавству СУ БПіЗП до динамічної, інтегрованої згідно вимог ISO 45001:2018 є не просто технічним оновленням, а фундаментальною зміною корпоративної філософії управління. При цьому трансформується сприйняття безпеки від бюрократичної необхідності виконання законодавчих і нормативно-правових вимог, що реалізується в першій системі, до розуміння безпеки – як невід'ємної частини операційної досконалості та сталого розвитку підприємства. Порівняльний аналіз вимог СУ БПіЗП згідно ЗУ «Про охорону праці» та ISO 45001:2018 наведено в табл. 1.

Проаналізуємо роль окремого працівника в СУ БПіЗП. Хоча працівник є останнім бар'єром захисту від небезпеки, його дії, рішення та поведінка значною мірою формуються та обмежуються системами, процедурами та, найголовніше, культурою безпеки, створеною на вищих рівнях ієрархії – підприємством та державою.

Законодавство України чітко визначає, що безпека на робочому місці є двостороннім процесом. Стаття 14 Закону «Про охорону праці» встановлює конкретні обов'язки для кожного працівника, які доповнюють обов'язки роботодавця [15]. До ключових зобов'язань працівника належать (рис. 7).

Важливо підкреслити, що за порушення цих вимог працівник несе безпосередню відповідальність, яка може мати дисциплінарний, адміністративний або навіть кримінальний характер, залежно від тяжкості наслідків [19].

Формальні правила та процедури є необхідною, але не достатньою умовою для створення безпечного робочого середовища. Те, що дійсно визначає рівень безпеки на підприємстві – це культура безпеки. Це поняття описує спільні цінності, переконання, норми поведінки та ставлення до безпеки, які поділяють усі члени організації, від вищого керівництва до рядового працівника. По суті, «те, як ми робимо, коли ніхто не дивиться» [20].

Сильна культура безпеки є тим «клеєм», який змушує формальні СУ БПіЗП працювати на практиці. Вона перетворює пасивне дотримання правил працівниками на активну його участь у забезпеченні безпеки праці на підприємстві. Для цього застосовуються декілька елементів (рис.8):

Поєднання зазначених елементів загальної культури безпеки (рис. 9) дозволяє сформулювати той чи інший вплив на працівника і його мотивацію дотримуватись і виконувати вимоги БПіЗП.

Розглянемо приклад багаторівневої відповідальності в організації за всіма рівнями безпеки для забезпечення процесу керування ризиками на прикладі - хімічних речовин (табл. 3).

Наявність розгалуженої законодавчої бази була б недієвою без механізму державного нагляду та контролю. Цю функцію в Україні виконує Державна служба України з питань праці (Держпраці) та її територіальні органи [13]. Держпраці є центральним органом виконавчої влади,

Таблиця 1

Порівняльний аналіз вимог СУ БПіЗП згідно ЗУ про охорону праці та ISO 45001:2018

Ключовий елемент	Підхід української СУ ОЗіБП (на основі Закону та НПА)	Підхід ISO 45001:2018
Лідерство та політика	Вимагає наявності політики та призначення відповідальних осіб. Відповідальність часто делегується службі ОП.	Вимагає від вищого керівництва особистої підзвітності, інтеграції ОЗіБП в бізнес-стратегію та створення культури безпеки.
Контекст організації	Не є явною вимогою. Фокус на внутрішніх процесах.	Обов'язковий аналіз внутрішніх та зовнішніх факторів, а також потреб та очікувань зацікавлених сторін.
Управління ризиками	Фокус на виконанні і контролі законодавчих і НПА вимог з ОЗіБП.	Комплексний підхід: управління не лише ризиками для ОЗіБП, але й можливостями для її покращення.
Участь працівників	Передбачає консультації, часто через профспілки або уповноважених осіб.	Вимагає активної участі працівників (не лише керівників) у прийнятті рішень, розслідуваннях, розробці політики.
Структура та підхід	Функціональний підхід, орієнтований на виконання конкретних завдань та дотримання вимог.	Процесний підхід, побудований на циклі PDCA (Плануй-Роби-Перевіряй-Дій) для безперервного вдосконалення.
Інтеграція	Може існувати як окрема, паралельна система управління.	Має високорівневу структуру (Annex SL), що спрощує інтеграцію з іншими системами менеджменту (ISO 9001, ISO 14001).

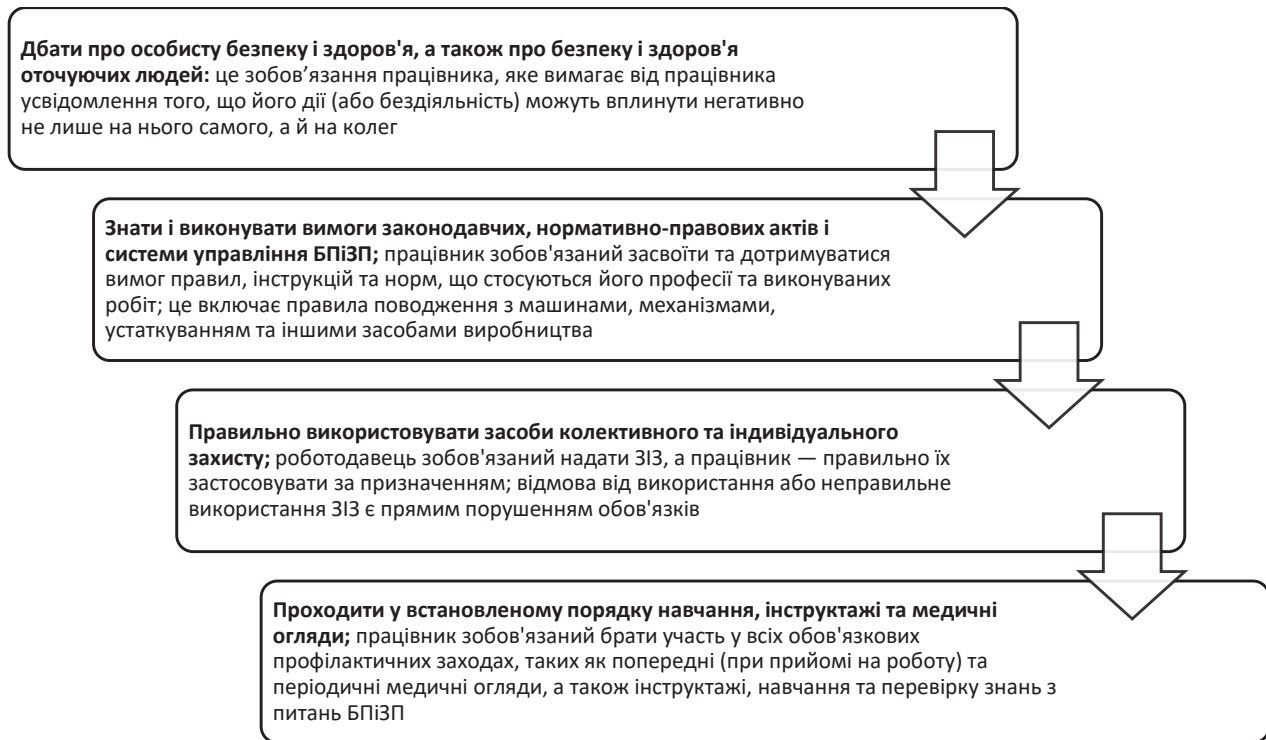


Рис. 7. Ключові обов'язки працівника у забезпеченні безпеки праці та здоров'я

Інформована культура

керівництво та працівники мають глибоке розуміння небезпек та їх ризиків, притаманних їхній діяльності

Культура звітності (Reporting Culture)

створюється атмосфера довіри, в якій працівники не бояться повідомляти про помилки, інциденти та "майже нещасні випадки" (near-misses), не очікуючи покарання. Такі повідомлення розглядаються як безцінна можливість для навчання та поліпшення системи управління БПіЗП

Справедлива культура відповідальності (Just Culture)

передбачає чітке розмежування між свідомим порушенням правил (неприйнятна поведінка) та ненавмисною помилкою. Організація не карає за чесні помилки, але не підтримує грубу недбалість

Гнучка до змін культура

здатність організації адаптувати свої процедури до несподіваних або мінливих умов, не жертвуючи при цьому станом БПіЗП

Культура навчання (Learning Culture)

- організація активно аналізує всі інциденти, виявляє корінні причини та впроваджує зміни, щоб запобігти їх повторенню

Рис. 8. Типологія елементів організаційної культури безпеки



Рис. 9. Можливі комбінації складових культури безпеки

Таблиця 3

**Багаторівнева відповідальність за процесом керування ризиками
на прикладі хімічних речовин**

Рівень безпеки	Відповідальність та заходи
Державний	Встановлення гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Вимоги до маркування хімічної продукції та наявності паспортів безпеки (SDS). Встановлення вимог до проектування та експлуатації систем вентиляції. Здійснення нагляду та контролю за дотриманням норм.
Корпоративний (організація, підприємство)	Проведення ідентифікації та оцінки ризиків, пов'язаних з конкретними хімічними речовинами, що використовуються. Реалізація ієрархії запобіжних заходів щодо зниження ризиків: пошук можливостей заміни небезпечних речовин на менш небезпечні (заміна); встановлення місцевої витяжної вентиляції (інженерний захід). Розробка інструкцій та процедур безпечного поводження з хімікатами (адміністративний захід). Забезпечення працівників відповідними ЗІЗ (респиратори, захисні костюми, рукавички) та навчання їх правильному використанню. Організація періодичних медичних оглядів та моніторингу стану здоров'я працівників.
Індивідуальний (працівник)	Чітке дотримання вимог інструкцій та процедур безпечного поводження з хімічними речовинами. Обов'язкове та правильне використання наданих ЗІЗ. Негайне повідомлення керівника про будь-які розливи, витоки, несправності обладнання або погіршення самопочуття. Участь у навчанні та проходженні медичних оглядів.

що реалізує державну політику у сферах промислової безпеки, ОЗІБП та гірничого нагляду [21]:

- **проведення перевірки (інспекційного відвідування)**, це коли інспектори Держпраці відвідують підприємство для перевірки дотримання законодавства про БПіЗП;

- **складання акту** за результатами перевірки, в якому фіксуються виявлені порушення.

- **складання припису** на підставі акту, який видається для обов'язкового виконання та усунення виявлених порушень із встановленням конкретних термінів;

- **повторна перевірка** після закінчення терміну, наданого для усунення порушень;

- **накладення штрафу** у разі невиконання вимог припису на підприємство та/або його посадових осіб накладаються фінансові санкції.

Цей механізм створює прямий економічний стимул для дотримання вимог БПіЗП. Штрафні санкції за порушення, особливо у випадках, що призвели до травматизму чи професійних захворювань, можуть бути досить значними. Це змушує роботодавців оцінювати, що є економічно доцільнішим: нести збитки від штрафів, виплат компенсацій та простоїв виробництва, чи своєчасно інвестувати кошти у запобіжні і захисні заходи, які зберігають життя та здоров'я працівників [22].

Таким чином, державний нагляд позиціонує БПіЗП. на підприємстві, як керований фінансовий ризик. Однак, такий підхід має і зворотний бік. Він формує сприйняття БПіЗП. переважно як «центру витрат, який потрібно оптимізувати, а не як «центру інвестицій у цінність», що сприяє підвищенню безпеки життя і здоров'я працівників, продуктивності, лояльності персоналу та стійкості бізнесу. Переважно каральний характер державного контролю може створювати антагоністичні відносини між регулятором та підприємствами. У більш сучасних СУ БПіЗП. окрім «батого» у вигляді штрафів, активно використовується і "пряник" – позитивні стимули, такі як податкові пільги, спрощення дозвільних процедур або переваги у державних закупівлях для підприємств, що демонструють зразкові показники безпеки та мають сертифіковані системи управління (наприклад, за вимогами ISO 45001:2018). Відсутність таких механізмів в українській практиці є потенційною слабкістю державної політики, оскільки вона обмежує мотивацію виключно уникненням покарання, а не прагненням до досконалості.

Отже для підвищення результативності всієї ієрархії безпеки праці потрібно перейти до ризик-орієнтованого нагляду. Змістити фокус інспекційної діяльності з перевірки формальної відповідності всім вимогам на оцінку дієвості СУ БПіЗП на підприємстві. Концентрувати зусилля інспекцій на галузях та підприємствах з найвищим рівнем ризику. Крім того, необхідно розробити та запровадити програми, що заохочують підприємства з позитивними показниками БПіЗП. Це може включати публічне визнання, зниження частоти планових перевірок, спрощення дозвільних процедур або надання переваг у державних тендерах.

Прискорити та спростити НПАОП згідно директив ЄС в сфері БПіЗП. Провести системний перегляд нормативно-правової бази з метою її консолідації, усунення застарілих та суперечливих норм, та гармонізації з сучасними, ризик-орієнтованими підходами, що застосовуються в ЄС. Це зменшить бюрократичне навантаження на підприємства та підвищить зрозумілість вимог.

Наступним кроком являється забезпечення лідерства керівництва підприємств у сфері безпеки. Відійти від практики делегування питань безпеки виключно службі БПіЗП. Вище керівництво повинно особисто демонструвати прихильність до безпеки, включати показники ОЗіБП до ключових бізнес-метрик та виділяти необхідні ресурси. Важливо також інвестувати в культуру безпеки працівників, а не лише у відповідність

СУ БПіЗП. Впроваджувати програми, спрямовані на активне формування позитивної культури безпеки через залучення працівників, створення прозорих та справедливих систем звітності про інциденти, та сприяння культурі безперервного навчання.

Розробляти і впроваджувати системи управління БПіЗП згідно вимог ISO 45001:2018. Використовувати міжнародний стандарт не як формальну вимогу для отримання сертифіката, а як практичний інструмент для побудови СУ БПіЗП.

На рівні працівника необхідно сприяти його проактивній участі. Заохочувати працівників переходити від пасивного дотримання правил до активної участі в процесах управління безпекою: участь в визначенні небезпек, рівня їх ризиків, оцінках ризиків, роботі комісій з БПіЗП, розробці та перегляді інструкцій, процедур, тощо. Надавати представникам профспілок та уповноваженим з питань БПіЗП необхідні знання, ресурси та повноваження для дієвого представництва інтересів працівників, ведення конструктивного діалогу з роботодавцем та здійснення громадського контролю.

Реалізація цих рекомендацій дозволить Україні перейти від фрагментованої та переважно реактивної системи до інтегрованої, проактивної та стійкої системи управління БПіЗП, яка дієво захищатиме найвищу цінність в цьому світі – життя та здоров'я працівників.

Висновки. Проведено комплексний аналіз взаємозв'язку державного, корпоративного і індивідуального рівнів безпеки в організації, що дозволив встановити, що дієвість системи управління безпекою праці досягається лише завдяки синергетичному ефекту зазначених рівнів.

Синергетичний ефект полягає у перегляді нормативно-правової бази з метою її консолідації, усунення застарілих та суперечливих норм, та гармонізації її з сучасними, ризик-орієнтованими підходами на державному рівні; забезпечення лідерства, прихильності до безпеки, виділення необхідних ресурсів для розвитку культури безпеки працівників на корпоративному рівні та сприянні проактивної участі працівника у всіх питаннях безпеки на індивідуальному рівні.

Встановлено, до сприятливих чинників системи управління безпекою праці та здоров'я працівників відносять гармонізацію з нормами ЄС, поширення стандарту ISO 45001:2018, технологічний розвиток, що разом із переходом від базової, орієнтованої на відповідність законодавству системи управління безпекою праці та здоров'ям працівників до динамічної, інтегрованої згідно вимог ISO 45001:2018 є не просто

технічним оновленням, а фундаментальною зміною корпоративної філософії управління.

Показано, що на рішення та поведінку працівника впливає рівень культури безпеки, який повинен забезпечити гармонічний розвиток п'яти складових інформована культура, культури звітності (Reporting Culture), справедливої культури відповідальності (Just Culture), гнучкої

культури до змін та культура навчання (Learning Culture).

Розроблено рекомендації для всієї ієрархії безпеки праці, які передбачають певні кроки переходу до ризик-орієнтованого нагляду та зміщенню фокусу від інспекційної діяльності з перевірки формальної відповідності всім вимогам на оцінку дієвості системи управління безпекою праці.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Analysis of Common Requirements of the ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and ISO 45001:2018 Standards. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 11, n. 4, p. e15811427160, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27160>.
2. Sklad A. Assessing the impact of processes on the Occupational Safety and Health Management System's effectiveness using the fuzzy cognitive maps approach. *Safety Science*. 2019. 117. 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.021>.
3. Bochkovskiy A. Development of stochastic models for occupational hazards risk assessment. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*. 2019. 19. 68–78. <https://doi.org/10.32447/20784643.19.2019.07>.
4. Claxton G., Hosie P., Sharma P. Toward an effective occupational health and safety culture: A *multiple stakeholder perspective*. *J Safety Res*. 2022 Sep. 82. 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.04.006>. Epub 2022 May 2. PMID: 36031280.
5. Мезенцева І. О., Кузьменко О. О., Труш О. О., Вамболь С. О. Аналіз причин виробничого травматизму та шляхів його зниження в сучасних реаліях. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2023. 39(3–4). 8–14. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.39-3-4.2023.8-14>
6. Tsopa V., Cheberyachko S., Sharovatova O., Deryugin O., Lapko K. Concepts of Occupational Protection, Occupational Safety and Health and Well-Being of Employees at Work. *Social Development and Security*. 2025. 15(4). 116–125. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.4.11>
7. Mohd Zafar Shaikh. The Influence of Safety Culture on Reducing Workplace Accidents in Industrial Settings. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2024. 12(10s). 716. URL: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/7857>
8. Rosa María Cañaveras Perea, Ángel Tejada Ponce, María Pilar Sánchez González, How to prevent 3 million deaths worldwide: a systematic review of occupational accident research—a factor- and cost-based approach, *European Journal of Public Health*, Volume 35, Issue 1, February 2025, Pages 91–100. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae197>
9. Duryan M., Smyth H., Roberts A., Rowlinson S., Sherratt F. Knowledge transfer for occupational health and safety: Cultivating health and safety learning culture in construction firms. *Accid Anal Prev*. 2020 May. 139. 105496. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105496>. Epub 2020 Mar 18. PMID: 32199157.
10. Saxena V. Human Factors Analysis in Occupational Accident Prevention. In: Varde, P.V., Vinod, G., Joshi, N.S. (eds) *Advances in Risk and Reliability Modelling and Assessment*. ICRESH 2024. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3087-2_28
11. Shabani T., Jerie S., Shabani T. A comprehensive review of the Swiss cheese model in risk management. *Saf. Extreme Environ*. 2024. 6. 43–57. <https://doi.org/10.1007/s42797-023-00091-7>
12. Yuan S., Reniers G., Yang M. Dynamic-risk-informed safety barrier management: An application to cost-effective barrier optimization based on data from multiple sources. *J Loss Prev Process Ind*. 2023 83. 105034. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105034>
13. Bikram R. Pandey. Rethinking occupational health and safety principles—a systems perspective. *Journal of the Royal Society of New Zealand*. 2025. 55. 6. 1362–1383. <https://doi.org/10.1080/03036758.2024.2333555>
14. Салманов А. Г. Правове забезпечення охорони праці / А. Г. Салманов. *Журн. заступника головного лікаря*. 2017. № 2. С. 32–47.
15. Закон України № 2694-XII (1992). Україна. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>.
16. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Затверджено постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 № 37. Київ: Міністерство охорони здоров'я України, 1999. 28 с.
17. Sisca Mayang Phuspa, Dian Afif Arifah, Rindang Diannita, Norwahida Yaakub, Azizan Ramli, Mohd Shahril Abu Hanifah, Azim Azuan Osman, Nur Fazhilah Abdul Razak (2025), Dimensions of Safety Practices in Educational Institutions: A Scoping Review Toward Boarding School Adaptation, *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*: Vol. 14 No. 2. <https://doi.org/10.20473/ijosh.v13i2.2024.252-260>

18. Rosa Anaya-Aguilar, Manuel Suárez-Cebador, Juan Carlos Rubio-Romero, & Fuensanta Galindo-Reyes. Delphi assessment of occupational hazards in the wineries of Andalusia, in southern Spain. *Journal of Cleaner Production*. 2018. 196. 297–303. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.008>.
19. Ключка Ю. Кореляція класу об'єкта підвищеної небезпеки, маси небезпечних речовин та його ризику. *Social Development and Security*. 2025. 15(3). 149–162. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.15>
20. Bochkovskii A. P., Gogunskii V. D. Development of the method for the optimal management of occupational risks, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 3/3(93). 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132596>.
21. Гринчук Ю. С., Шемігон О. І., Вихор М. В. Контроль як функція державного управління: економіко-правова сутність та механізм застосування. *Ефективна економіка*. 2019. № 4. URL: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.3> (дата звернення: 17.11.2025).

REFERENCES:

1. Analysis of common requirements of the ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and ISO 45001:2018 standards. (2022). Research, Society and Development, 11(4), Article e15811427160. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27160>
2. Skład, A. (2019). Assessing the impact of processes on the Occupational Safety and Health Management System's effectiveness using the fuzzy cognitive maps approach. *Safety Science*, 117, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.021>
3. Bochkovskiy, A. (2019). Development of stochastic models for occupational hazards risk assessment. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, (19), 68–78. <https://doi.org/10.32447/20784643.19.2019.07>
4. Claxton, G., Hosie, P., & Sharma, P. (2022). Toward an effective occupational health and safety culture: A multiple stakeholder perspective. *Journal of Safety Research*, 82, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.04.006>
5. Mezentsseva, I. O., Kuzmenko, O. O., Trush, O. O., & Vambol, S. O. (2023). Analiz prychyn vyrobnychoho travmatyzmu ta shliakhiv yoho znyzhennia v suchasnykh realiakh [Analysis of causes of occupational injuries and ways to reduce them in modern conditions]. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini – Occupational Safety Problems in Ukraine*, 39(3–4), 8–14. <https://doi.org/10.36804/nddipbop.39-3-4.2023.8-14> [in Ukrainian].
6. Tsopa, V., Cheberyachko, S., Sharovatova, O., Deryugin, O., & Lapko, K. (2025). Concepts of occupational protection, occupational safety and health and well-being of employees at work. *Social Development and Security*, 15(4), 116–125. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.4.11>
7. Shaikh, M. Z. (2024). The influence of safety culture on reducing workplace accidents in industrial settings. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12(10s), 716. Retrieved from <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/7857>
8. Cañaveras Perea, R. M., Tejada Ponce, Á., & Sánchez González, M. P. (2025). How to prevent 3 million deaths worldwide: A systematic review of occupational accident research—a factor- and cost-based approach. *European Journal of Public Health*, 35(1), 91–100. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae197>
9. Duryan, M., Smyth, H., Roberts, A., Rowlinson, S., & Sherratt, F. (2020). Knowledge transfer for occupational health and safety: Cultivating health and safety learning culture in construction firms. *Accident Analysis & Prevention*, 139, Article 105496. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105496>
10. Saxena, V. (2024). Human factors analysis in occupational accident prevention. In P. V. Varde, G. Vinod, & N. S. Joshi (Eds.), *Advances in risk and reliability modelling and assessment (Lecture Notes in Mechanical Engineering)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3087-2_28
11. Shabani, T., Jerie, S., & Shabani, T. (2024). A comprehensive review of the Swiss cheese model in risk management. *Safety in Extreme Environments*, 6, 43–57. <https://doi.org/10.1007/s42797-023-00091-7>
12. Yuan, S., Reniers, G., & Yang, M. (2023). Dynamic-risk-informed safety barrier management: An application to cost-effective barrier optimization based on data from multiple sources. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 83, Article 105034. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105034>
13. Pandey, B. R. (2025). Rethinking occupational health and safety principles—a systems perspective. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 55(6), 1362–1383. <https://doi.org/10.1080/03036758.2024.2333555>
14. Salmanov, A. H. (2017). Pravove zabezpechennia okhorony pratsi [Legal support of occupational safety]. *Zhurnal zastupnyka holovnoho likaria – Journal of the Deputy Chief Physician*, (2), 32–47. [in Ukrainian].
15. Law of Ukraine No. 2694-XII. (1992). Pro okhoronu pratsi [On labor protection]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> [in Ukrainian].
16. Ministry of Health of Ukraine. (1999). DSN 3.3.6.037-99. Sanitarni normy vyrobnychoho shumy, ultrazvuku ta infrazvuku [State sanitary norms of industrial noise, ultrasound and infrasound]. Kyiv. [in Ukrainian].

17. Phuspa, S. M., Arifah, D. A., Diannita, R., Yaakub, N., Ramli, A., Hanifah, M. S. A., Osman, A. A., & Razak, N. F. A. (2025). Dimensions of safety practices in educational institutions: A scoping review toward boarding school adaptation. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 14(2). <https://doi.org/10.20473/ijosh.v13i2.2024.252-260>
18. Anaya-Aguilar, R., Suárez-Cebador, M., Rubio-Romero, J. C., & Galindo-Reyes, F. (2018). Delphi assessment of occupational hazards in the wineries of Andalusia, in southern Spain. *Journal of Cleaner Production*, 196, 297–303. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.008>
19. Kliuchka, Yu. (2025). Koreliatsiia klasu obiekta pidvyshchenoi nebezpeky, masy nebezpechnykh rehovyn ta yoho ryzyku [Correlation between the class of a high-risk facility, the mass of hazardous substances and its risk]. *Social Development and Security*, 15(3), 149–162. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.15> [in Ukrainian].
20. Bochkovskii, A. P., & Gogunskii, V. D. (2018). Development of the method for the optimal management of occupational risks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/3(93), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132596>
21. Hrynychuk, Yu. S., Shemigon, O. I., & Vykhov, M. V. (2019). Kontrol yak funktsiia derzhavnoho upravlinnia: ekonomiko-pravova sutnist ta mekhanizm zastosuvannia [Control as a function of public administration: Economic and legal essence and mechanism of application]. *Efektivna ekonomika – Efficient Economy*, (4). <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.3> [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

УДК 331.464.3(467):636.74.043.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-32>

ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ЯК ПРИХОВАНІ ПРИЧИНИ НЕЩАСНИХ ВИПАДКІВ У ПРОФЕСІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ РЯТУВАЛЬНИКІВ-КІНОЛОГІВ: ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДХОДІВ ДО РОЗСЛІДУВАННЯ

Шароватова Олена Павлівна,

кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри підвищення кваліфікації
та спеціалізованої підготовки у сфері цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України,
доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-2736-2189

Ващенко Вероніка Олександрівна,

магістр
Національного університету цивільного захисту України
ORCID ID: 0009-0004-2834-1322

У статті визначено особливості професійної діяльності рятувальників-кінологів, яка характеризується високою інтенсивністю фізичних і психоемоційних навантажень, роботою в екстремальних та непередбачуваних умовах, необхідністю швидкого прийняття рішень і постійною відповідальністю за життя людей та службових собак. Сукупність зазначених чинників формує підвищений рівень професійних ризиків, зокрема психофізіологічного характеру. Встановлено, що накопичення втоми призводить до зниження уваги, сповільнення реакцій, погіршення координації рухів, зростання ймовірності помилкових дій і порушення вимог безпеки праці. У таких умовах втома виступає не фоновим, а безпосереднім фактором ризику виникнення небезпечних ситуацій і нещасних випадків. Обґрунтовано необхідність удосконалення процедури розслідування нещасних випадків, зумовлених психофізіологічними причинами, оскільки традиційні підходи до аналізу травматизму не дають можливості повною мірою виявляти приховані механізми порушення безпечної поведінки, пов'язані зі втомою, стресом і перевантаженням. Інтеграція психофізіологічних показників у процес розслідування нещасних випадків сприятиме більш точному визначенню причин травматизму, формуванню обґрунтованих профілактичних заходів та підвищенню ефективності системи управління безпекою і здоров'ям працівників, зокрема, кінологічної служби Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Система профілактичних заходів, спрямованих на підвищення рівня безпеки та збереження здоров'я рятувальників-кінологів, має ґрунтуватися на комплексному підході та містити організаційні, психофізіологічні, навчальні й нормативні складові. Актуалізована доцільність переходу від формального обліку нещасних випадків до превентивної моделі управління ризиками, орієнтованої на раннє виявлення втоми та інших психофізіологічних передумов небезпечних ситуацій.

Ключові слова: психофізіологічні чинники, причини нещасних випадків, втома, рятувальники-кінологи, розслідування нещасних випадків.

Sharovatova Olena, Vashchenko Veronika. Psychophysiological factors as hidden causes of accidents in the professional activity of rescue dog handlers: ways to improve approaches to investigation

The article identifies the features of the professional activities of rescue dog handlers, which are characterized by high intensity of physical and psycho-emotional stress, work in extreme and unpredictable conditions, constant responsibility for the lives of people and service dogs. The combination of these factors creates an increased level of professional risks, in particular psycho-physiological ones. It has been established that the accumulation of fatigue leads to a decrease in attention, an increase in the likelihood of erroneous actions and violation of occupational safety requirements. In such conditions, fatigue is not a background, but a direct risk factor for the occurrence of dangerous situations and accidents. The need to improve the procedure for investigating accidents caused by psycho-physiological causes is substantiated, since traditional approaches to the analysis of injuries do not allow to fully identify hidden mechanisms of violations of safe behavior associated with fatigue, stress and overload. The integration of psychophysiological indicators into the accident investigation process will contribute to a more accurate determination of the causes of injuries, the formation of substantiated preventive measures and increasing the efficiency of the safety and health management system for employees. The system of preventive measures aimed at increasing the level of safety of rescue canine handlers should be based on an integrated approach and include organizational, psychophysiological, educational and regulatory components. The feasibility of transitioning from formal accident accounting to a preventive risk management model focused on early detection of fatigue and other psychophysiological prerequisites for dangerous situations has been updated.

Key words: psychophysiological factors, causes of accidents, fatigue, rescue dog handlers, accident investigation.

Вступ. В умовах воєнного стану та зростання кількості надзвичайних ситуацій кінологічні підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій працюють у режимі підвищеного навантаження, що значно збільшує ризик професійного виснаження, помилкових дій і, як наслідок, нещасних випадків серед рятувальників.

Кінологічна служба ДСНС України залучається до виконання завдань у найбільш небезпечних і психологічно напружених умовах, а саме до пошуково-рятувальних робіт після обстрілів, техногенних аварій, природних катастроф тощо. За таких умов психофізіологічна втомлюваність кінологів набуває системного характеру та безпосередньо впливає на здатність прийняття виважених рішень, дотримання вимог безпеки праці, а також на ефективність і безпеку взаємодії зі службовим собакою.

Аналіз нещасних випадків у підрозділах з підвищеним ризиком [1; 2] свідчить, що переважна частка травм пов'язана не з технічними відмовами, а з людським фактором, зокрема з порушенням алгоритмів безпечної поведінки, що стає наслідком зниження уваги, емоційного виснаження, накопиченої втоми. У більшості таких розслідувань людський фактор зводиться до категорії «особиста необережність потерпілого», без детального аналізу причин цих дій [3]. Важливо підкреслити, що під час розслідувань нещасних випадків у чинній практиці ДСНС психофізіологічні причини – постійно змінювані умови надзвичайних ситуацій – переважно залишаються поза увагою, до того ж чинна нормативна база з охорони праці та розслідування нещасних випадків, що сталися з особами рядового й начальницького складу служби цивільного захисту [4], не враховує специфіки кінологічної служби, що з позицій необхідності забезпечення безпеки виступає подвійним об'єктом ризику – «людина і тварина». Зазначене, зі свого боку, актуалізує і необхідність удосконалення відомих нормативних документів ДСНС України.

Методи та методики дослідження. Сучасні дослідження як джерело небезпечної поведінки дедалі більше визначають психосоціальні ризики.

У наукових доробках з охорони праці та ергономіки, зокрема, втомлюваність розглядається як ключовий чинник зниження надійності професійної діяльності [5]. Науковці підтверджують зв'язок між тривалістю робочих змін і травматизмом; доводять, що втома суттєво знижує когнітивний контроль і прямо корелює з порушенням процедур безпеки; у разі хронічної

втоми зростає ризик помилок і травм; навіть короточасне неповноцінне відновлення підвищує аварійність [1; 6].

Дослідниками звертається увага на недооцінку психосоціальних ризиків у розслідуваннях, особливо в підрозділах із підвищеним ризиком професійної діяльності; наголошується, що функціональний стан працівника не менш важливий для безпеки, ніж технічні умови праці [7; 8]. Певна група досліджень присвячена різним професіям із підвищеним ризиком (рятувальникам, військовим, правоохоронцям), однак діяльність кінологів, яка цілком відповідає критеріям екстремальної професії, досліджується значно менше [9].

Аналітика Міжнародної організації праці свідчить, що психофізіологічна втома підвищує ризик травм в 1,5–2 рази [10; 11].

Сучасні підходи до аналізу людського фактора зважають, що аварії виникають через накопичення латентних помилок. Втома, спричиняючи професійне вигорання і зниження відповідальності за безпеку, виступаючи однією з латентних причин аварій, зумовлює потребу в деталізованому аналізі психофізіологічних чинників під час розслідувань нещасних випадків [12]. У контексті досліджень особливостей діяльності кінологічних підрозділів це питання масштабується від вивчення особливостей фізіологічного і психологічного стану самого кінолога до наслідків впливу втоми людини на ефективність собаки та нестабільність поведінки тварини, передачі стресу від людини до собаки й необхідності врахування безпекових наслідків через ризики травм і подій у тандемі «людина – собака» [13–15].

Отже, за сукупністю аналізу різних джерел можна зазначити, що більшість порушень безпеки є наслідком функціональних збоїв людини і психофізіологічного виснаження, а не дисциплінарною проблемою і свідомим ігноруванням правил; втомлюваність є системним фактором ризику, але в практиці забезпечення безпеки праці часто недооцінюється.

Міжнародні кінологічні та ветеринарні дослідження доводять тісний взаємозв'язок між станом людини і поведінкою собаки. Стрес і втома кінолога негативно впливають на керуваність і надійність службового собаки [16; 17]. Помилки кінолога відповідно підвищують ризик травм і для людини, і для тварини.

З огляду на вищезазначене важливим є обґрунтування впливу психофізіологічних чинників, як прихованих причин нещасних випадків, на рівень безпеки праці, зокрема серед рятувальників-кінологів, та окреслення напрямів

удосконалення розслідування нещасних випадків та їх профілактики. Для цього потрібно визначити особливості діяльності і професійних ризиків кінологічної служби ДСНС; проаналізувати зв'язок втрати з порушенням вимог безпеки праці; обґрунтувати необхідність удосконалення розслідування нещасних випадків, зумовлених психофізіологічними причинами.

Проведення дослідження уможливорює використання загальнонаукового і прогностичного методів для здійснення аналізу нормативно-правових актів з безпеки праці та розслідування нещасних випадків; виявлення певних недосконалостей у чинних підходах до розслідувань через повторюваність формулювань і недооцінку деталей реальних причин; визначення психофізіологічних чинників безпеки праці і прихованого характеру більшості з них; формування узагальнення щодо впливу втрати на безпечну поведінку; перенесення загальних закономірностей досліджуваних питань на специфіку кінологічної служби ДСНС; запропонування заходів щодо зниження травматизму та формування рекомендацій превентивного характеру.

Результати та дискусії. Кінологія як наука про собак виникла в останній чверті XIX століття. У цей період у світі розпочалась активна робота щодо залучення собак до професійної діяльності. Поступово собаки дедалі більше використовувалися в роботі різних служб: конвойної, патрульно-постової, патрульно-дозornoї, сторожової, санітарної, їздової, зв'язку, розвідки, мінно-пошукової, пошуково-рятувальної тощо. Фахівці з Великої Британії під час Другої світової війни одними з перших долучили собак до пошуку людей під завалами, проте цей досвід певний час не мав поширення. У той же період було створено цілі підрозділи спеціальних собак, яких залучали як санітарів, зв'язківців, міношукачів, диверсантів тощо. Існували також і «протитанкові собаки» – підготовлені батальйони собак-камікадзе, які під час бойових дій знищили кілька сотень ворожих танків. Справжній переворот у залученні собак до пошуково-рятувальних операцій відбувся в 1980 році після землетрусу в Алжирі. Німецькі кінологи першими взяли двох вівчарок для пошуку людей під завалами. Відтоді досвідом вдалої роботи кінологічних розрахунків зацікавилися й інші країни [13].

Сучасна кінологічна служба посідає дуже важливе місце в системі силових органів нашої держави, використання службових собак є настільки ефективним, що досі жоден технічний засіб не зміг замінити собою гострий нюх

собаки. Саме через це кінологічні підрозділи існують у більшості силових структур України, а саме в Національній поліції України, Державній прикордонній службі України, Державній службі України з надзвичайних ситуацій, Національній гвардії України. Перед кожною із цих служб стоять свої специфічні завдання, тому і кінологічні підрозділи кожної з них мають свої особливості [13].

У 2006 році в структурі Міністерства надзвичайних ситуацій України (нині Державна служба України з надзвичайних ситуацій) була створена кінологічна служба, яка взяла на себе функції розвитку пошуково-рятувального кінологічного руху в Україні. Сьогодні діяльність кінологічної служби Державної служби України з надзвичайних ситуацій чітко регламентується законодавчими та нормативно-правовими актами [18–22].

В умовах сьогодення, під час російсько-української війни, ставлення до собак стало більш гуманним. Ніхто не відправляє собак під танки, не примушує протягувати дрти та витягувати поранених. Сучасні технології просунулися далеко вперед, тож і потреби в таких жертвах вже немає. Однак допомога чотирилапих і зараз є вкрай важливою та необхідною. Собаки шукають вибухонебезпечні предмети, зниклих бійців та їхні останки, проводять антитерористичну роботу, затримують правопорушників, розкопують завали житлових будинків. Службові собаки використовуються в службовій діяльності працівників ДСНС, де допомагають у розшуку та наданні допомоги постраждалим під час стихійного лиха або різного роду надзвичайних ситуацій. При цьому ефективне використання службових собак, організація їх догляду й утримання потребують від рятувальників-кінологів наявності спеціальних знань [14].

Відповідно до нормативних документів основними завданнями та функціями кінологічних підрозділів є [18]:

1) участь у попередженні надзвичайних ситуацій та ліквідації їх наслідків шляхом застосування засобів і методів службового собаківництва;

2) організація та ведення пошуку, своєчасне виявлення та надання першої допомоги постраждалим під час надзвичайних ситуацій техногенного, природного та військового характеру (землетруси, снігові лавини, обвали, зсуви, урагани, бурі тощо);

3) підтримання постійної готовності кінологічних підрозділів для ефективного використання службових собак у розшуку людей, вибухових речовин і пристроїв, трупів у період ліквідації наслідків аварій, стихійного лиха,

терористичних актів та під час інших надзвичайних ситуацій;

4) організація системи навчання та підготовки кінологічних підрозділів до виконання пошукових робіт в умовах надзвичайних ситуацій різного характеру, підвищення професійної підготовки штатних і нештатних кінологів-рятувальників, періодична сертифікація кінологічних розрахунків;

5) здійснення контролю за порядком утримання, збереження та плеїнного відбору поголів'я собак, дресирування службових собак;

6) співпраця з міжнародними кінологічними громадськими організаціями (Міжнародна організація рятувальних собак), участь у міжнародних семінарах з питань кінології та навчання із застосуванням спеціально навчених собак тощо.

Організація пошуково-рятувальних робіт працівниками кінологічних підрозділів проводиться в різних умовах надзвичайних ситуацій, основні з яких можна згрупувати таким чином:

- у завалах зруйнованих будинків і споруд, що утворюються внаслідок природних (землетрус, ураган тощо), техногенних (вибухи, раптове руйнування будинків, споруд тощо) надзвичайних ситуацій;

- у разі катастроф транспортних засобів (літаків, потягів, кораблів тощо);

- у лавинних виносках, накопиченні землі, каменів, піску від селів і обвалів;

- у природному середовищі (пошук постраждалих і зниклих у лісі, гірській місцевості, прибережних районах тощо);

- на водних об'єктах.

Оперативні дії починаються з моменту прибуття підрозділу на місце пошуку. Кінологи-рятувальники повинні володіти інформацією щодо оперативної обстановки в районі ведення пошуково-рятувальних робіт; меж зони можливого знаходження постраждалих; можливостей собак у цій обстановці; тактики використання собак; необхідних заходів і засобів безпеки та порядку взаємодії з іншим рятувальними підрозділами.

До важливих специфічних особливостей професійної діяльності кінологів-рятувальників дослідниками віднесені [13; 15]:

- недостовірність інформації або повна відсутність її під час проведення оперативних дій;

- ситуація невизначеності завдання;

- незвичність і важкість просторового орієнтування в незнайомій місцевості з обмеженою видимістю та прохідністю;

- інтенсивний темп роботи за дефіциту часу;

- постійне нервово-психічне напруження через несприятливі погодні та санітарно-гігієнічні

умови, відсутність належних умов праці та відпочинку;

- дискомфортний стан через перебування в засобах індивідуального захисту дихання та тіла;

- постійна загроза для життя і здоров'я;

- можливість виникнення панічних настроїв унаслідок впливу негативних факторів життєдіяльності (зіткнення з трупами та фрагментами людських тіл, жахливі реалії – зруйновані будівлі, літаки тощо);

- перевага фізичної праці, надмірна рухова активність швидко-силового типу.

У межах специфіки професійної діяльності кінологів-рятувальників важливу роль також відіграють: висока відповідальність за наслідки реалізації прийнятих рішень, суворе регламентація професійної діяльності, наявність дезінформації, організація роботи в системі «людина – собака», робота з наркотичними засобами, їх аналогами, зброєю, боєприпасами, правопорушниками, часті зміни місця дислокації, порушення режиму харчування та сну, несення служби в нічний, надурочний час, а також у вихідні та святкові дні, температурні впливи за різних умов несення служби тощо [15; 23].

Отже, щоденні умови діяльності, у яких доводиться працювати кінологам-рятувальникам, характеризуються сильними психотравматичними факторами. Дослідження дають можливість виділити та ранжувати негативні стрес-фактори, пов'язані з виконанням професійних завдань, а саме такі ситуації професійної діяльності: потрапляння під завали; пошуково-рятувальні роботи в складних погодних умовах; збій у роботі собаки або отримання нею пошкодження, травми; надання першої долікарської допомоги постраждалим; вилучення та знаходження трупів; підготовка до сертифікації кінологічного розрахунку; необхідність ухвалення рішення в умовах дефіциту інформації; здійснення моніторингу навколишнього середовища в місцях, небезпечних для життя.

Низка характеристик роботи – тривалий робочий день, необхідність працювати швидко, ініціативність, недостатнє отримання інформації, необхідність поєднувати різні завдання, високе робоче навантаження, відповідальність, часті перерви, понаднормові години, несправедливе ставлення, відсутність поваги з боку інших та недостатня підтримка – у літературі ототожнені з професійним стресом.

Високий професійний стрес кінологів-рятувальників зумовлюється також і певною специфікою діяльності, зокрема: недостовірною інформацією або повною відсутністю її під час

проведення оперативних дій; ситуаціями невідзначеності завдання; незвичністю і важкістю просторового орієнтування в незнайомій місцевості з обмеженою видимістю та прохідністю; інтенсивним темпом роботи за дефіциту часу; постійним нервово-психічним напруженням через несприятливі погодні та санітарно-гігієнічні умови; дискомфортом станом через перебування в засобах індивідуального захисту дихання та тіла; постійною загрозою для життя і здоров'я; можливістю виникнення панічних настроїв внаслідок впливу негативних факторів життєдіяльності; послабленням уваги, пам'яті, мислення, порушенням точності рухів та дій, їх послідовності; неритмічністю режимів роботи, що призводить до підвищеної втомлюваності, виснаженості та психічної напруги [15].

Переживання стресу змінює те, як людина почувається, думає та поводить, а також може призводити до змін у її фізіологічних функціях. Багато з цих змін самі по собі є незначною дисфункцією та пов'язаним із нею дискомфортом. Багато з них легко можна подолати, хоча вони і погіршують якість життя. Однак для деяких працівників за певних обставин вони можуть призвести до низької продуктивності праці, інших психологічних і соціальних проблем, а також до погіршення фізичного здоров'я.

Професійне навантаження через накопичення втоми призводить до порушення психофізіологічних функцій. Це, зі свого боку, зумовлює зниження безпечної поведінки і підвищує імовірність порушення вимог охорони праці, а отже, призводить до зростання ризику нещасного випадку.

У дослідженнях з охорони праці та людського фактора причинно-наслідковий ланцюг «втома – нещасний випадок» є стійким, повторюваним і статистично підтвердженим. Втома не є випадковим чинником, вона системно знижує рівень безпеки праці та часто є першопричиною помилкових дій. Тож втома – це прихований причинний фактор травматизму.

Важливо підкреслити, що професійна діяльність кінолога ДСНС має подвійну відповідальність: по-перше, за власну безпеку; по-друге – за контроль поведінки службового собаки в умовах підвищеної небезпеки. На відміну від багатьох інших підрозділів, втомлюваність кінолога формується одночасно під впливом інтенсивного фізичного навантаження; емоційної напруги під час пошуково-рятувальних робіт; необхідності постійного когнітивного контролю дій тварини; роботи в нестандартних, часто небезпечних середовищах (завали, пожежі, руйнування тощо).

Втома кінолога має комбінований психофізіологічний характер, що значно підвищує ризик порушення безпеки праці. Втомлений працівник частіше відмовляється від використання засобів індивідуального захисту, зростає кількість пропущених сигналів небезпеки. Оскільки в такому стані спрощується процес прийняття рішень, людина діє «за шаблоном», скорочує або пропускає обов'язкові процедури безпеки. Таким чином, ігнорування факту втоми під час аналізу причин травматизму призводить до неповноти розслідування та зниження ефективності профілактичних заходів.

Відповідно до Порядку розслідування та ведення обліку нещасних випадків, що сталися з особами рядового й начальницького складу служби цивільного захисту [4], нещасний випадок – обмежена в часі подія або раптовий вплив на особу небезпечного виробничого фактора чи середовища, що сталися під час виконання службових обов'язків, унаслідок яких заподіяно шкоду здоров'ю, зокрема від одержання поранення, травми, у тому числі внаслідок тілесних ушкоджень, гострого професійного захворювання (отруєння) та інших отруєнь, одержання сонячного або теплового удару, опіку, обмороження, а також у разі утоплення, ураження електричним струмом, блискавкою та іонізуючим випромінюванням, одержання інших ушкоджень внаслідок аварії, пожежі, стихійного лиха (землетрусу, зсуву, повені, урагану тощо), контакту з представниками тваринного та рослинного світу, які призвели до втрати працездатності на один робочий день чи більше або до необхідності переведення його на іншу (легшу) роботу не менш як на один робочий день, або смерті, зникнення особи.

Серед офіційно затверджених зазначеним Порядком причин нещасного випадку визначені:

- технічні: конструктивні недоліки, недосконалість, недостатня надійність транспортних засобів; невідповідність засобів колективного й індивідуального захисту встановленим вимогам та їх недостатність; незадовільний технічний стан будинків, споруд, території; незадовільний технічний стан машин, механізмів, засобів, устаткування; неякісне розроблення або відсутність проєктної документації обладнання, устаткування; незадовільний стан виробничого середовища (перевищення гранично допустимих концентрацій (рівнів) небезпечних та шкідливих виробничих факторів) та інші види;

- організаційні: незадовільне функціонування, недосконалість або відсутність системи управління охороною праці; недоліки під час навчання з охорони праці та безпечного

ведення робіт, а саме відсутність або неякісне проведення інструктажу з питань охорони праці, допуск до служби без навчання та перевірки знань з питань охорони праці, недодержання вимог законодавства про охорону праці, неякісна розробка, недосконалість інструкцій з охорони праці, безпечного ведення робіт або їх відсутність; також відсутність у посадових інструкціях визначення функціональних обов'язків з питань охорони праці; порушення вимог безпеки під час експлуатації обладнання, устаткування, машин, механізмів тощо; порушення вимог безпеки під час експлуатації (користування) транспорту (автомобільного, водного, залізничного, повітряного); відсутність або неякісне проведення медичного обстеження (професійного відбору); незабезпеченість засобами індивідуального захисту; невикористання засобів індивідуального захисту за їх наявності; порушення режиму служби та відпочинку; залучення до роботи осіб не за спеціальністю (професією); невиконання вимог інструкцій з охорони праці; інші організаційні причини;

– психофізіологічні: алкогольне, наркотичне, токсикологічне сп'яніння, отруєння або перебування під впливом лікарських препаратів, що знижують увагу та швидкість реакції; низька нервово-психічна стійкість; нервово-психічні перевантаження; емоційні перевантаження; розумові перенапруження, перенапруження аналізаторів; монотонність виконання завдань; помилкові дії внаслідок втоми особи через надмірну важкість і напруженість роботи; особиста необережність потерпілого (у разі відсутності технічних і організаційних причин, впливу шкідливих або небезпечних виробничих факторів, порушень вимог законодавчих і нормативно-правових актів та інструкцій тощо); травмування (смерть) унаслідок протиправних дій інших осіб; незадовільні фізичні дані або стан здоров'я; фізичні перевантаження; травмування внаслідок виконання вправ з фізичної підготовки, зокрема під час пожежно-прикладного спорту й інші психофізіологічні причини;

– техногенні, природні, екологічні та соціальні: викид небезпечних хімічних, радіоактивних, біологічних речовин; контакт із представниками тваринного та рослинного світу; стихійне лихо (метеорологічні, топологічні та тектонічні катастрофи: землетрус, зсув, селі, снігові лавини, повінь, просідання і зсув ґрунту тощо); гідрометеорологічні явища (мороз, ожеледиця, замітіль, шквальний вітер, ураган, град, спека, туман, злива, блискавка); соціальний конфлікт (страйк, оголошена та неоголошена війна, терористичний акт, блокада, революція, заколот, повстання,

масові заворушення, громадська демонстрація, протиправні дії осіб тощо) та інші [4].

Отже, системне управління втомлюваністю персоналу та деталізована інтеграція психофізіологічних чинників у розслідування нещасних випадків може вважатись одним із шляхів розвитку психосоціальної підтримки кінологів-рятувальників і переходом від загального до превентивного підходу в системі зниження травматизму й ефективного забезпечення безпеки праці, зокрема, в кінологічній службі ДСНС.

Результат таких ініціатив вбачається в закріпленні поняття «втомлюваність» як фактора ризику; включенні психофізіологічних ризиків у систему управління безпекою та здоров'ям працівників на роботі; встановленні детальних причин травматизму (доповнення актів розслідування пунктами щодо тривалості безперервної роботи кінолога, кількості відпрацьованих посліпль змін, наявності відновлювальних перерв перед інцидентом тощо); використанні результатів розслідувань для прогнозування ризиків; можливості аналізу «передаварійних станів»; створенні бази даних психофізіологічних факторів нещасних випадків; можливості виявлення прихованих причин травматизму.

Серед профілактичних заходів, що зумовлюватимуть підвищення безпеки та збереження здоров'я працівників кінологічної служби ДСНС, мають бути:

– організаційні заходи – запровадження раціональних режимів праці та відпочинку з урахуванням тривалості чергувань, інтенсивності пошуково-рятувальних робіт і рівня психоемоційного навантаження; обмеження безперервної роботи в екстремальних умовах; врахування психофізіологічних факторів під час формування графіків чергувань і виїздів;

– психофізіологічні заходи – запровадження програм психологічної підтримки та профілактики емоційного вигорання; організація заходів з активного відновлення (короткочасний відпочинок, дихальні вправи, релаксаційні техніки) рятувальників;

– навчальні заходи – включення до програм підготовки та підвищення кваліфікації модулів з управління втомою, стресостійкості та самоконтролю функціонального стану; навчання рятувальників розпізнавання ранніх ознак втоми та психоемоційного перевантаження в себе та в колег; формування культури безпеки, орієнтованої на відповідальне ставлення до стану власного здоров'я;

– нормативні заходи – удосконалення системи розслідування нещасних випадків через розширення переліку відповідних причин

психофізіологічними факторами; впровадження алгоритмів аналізу передаварійних станів під час службових розслідувань; аналіз накопичених даних для прогнозування ризиків та визначення типових небезпечних сценаріїв; аналіз психофізіологічних факторів і результатів нещасних випадків і небезпечних інцидентів під час розроблення управлінських рішень у сфері охорони праці; впровадження принципів превентивності та безперервного вдосконалення системи безпеки.

Висновки. Діяльність кінологічних розрахунків із собаками-рятувальниками має різні форми, а також характеризується відмінними методами самої її організації. Відповідно до вимог нормативних документів, під час здійснення професійної діяльності, працівники кінологічних підрозділів повинні бути обережними та дотримуватися як правил особистої гігієни, так і заходів безпеки праці [19]. Поряд із складностями підготовки службових собак суттєвою особливістю їхньої професійної діяльності є небезпека, яка супроводжує кінолога під час пошуково-рятувальних робіт. Важливе місце серед факторів небезпеки у специфіці такої діяльності під час надзвичайних ситуацій належить психофізіологічним чинникам, зокрема систематичній втомі, як прихованим причинам нещасних випадків.

Використання результатів розслідувань нещасних випадків як аналітичного інструменту для прогнозування ризиків сприятиме переходу від реактивної до превентивної моделі управління охороною праці. Створення структурованої бази даних психофізіологічних факторів нещасних випадків відкриє можливості для

ідентифікації прихованих причин травматизму та розроблення цільових профілактичних заходів, орієнтованих на реальні умови трудової діяльності.

Інтеграція психофізіологічних ризиків у систему управління безпекою та здоров'ям на роботі створить передумови для більш глибокого розуміння механізмів формування небезпечних ситуацій, зокрема в умовах підвищеного навантаження, стресу, дефіциту часу й інформаційної перевантаженості. Такий підхід надасть змогу не лише фіксувати наслідки травматизму, а й виявляти «передаварійні стани», що передують нещасним випадкам.

Система профілактичних заходів, спрямованих на підвищення рівня безпеки та збереження здоров'я рятувальників-кінологів, має ґрунтуватися на комплексному підході та містити організаційні, психофізіологічні, навчальні й нормативні складові. Її реалізація передбачає раціоналізацію режимів праці та відпочинку з урахуванням інтенсивності службових навантажень і психоемоційного стану рятувальників, впровадження програм психологічної підтримки й активного відновлення, формування навичок управління втомою та самоконтролю функціонального стану, а також удосконалення нормативно-методичних підходів до розслідування нещасних випадків з урахуванням психофізіологічних факторів. Використання результатів аналізу передаварійних станів і накопичених даних про небезпечні інциденти для прогнозування ризиків та прийняття управлінських рішень забезпечить реалізацію превентивної моделі охорони праці й безперервне вдосконалення системи безпеки, зокрема в кінологічній службі ДСНС.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Patterson P. D., Weaver M. D., Frank R. C., Warner C. W., Martin-Gill Ch., Guyette F. X., Fairbanks R. J., Hubble M. W., Songer T. J., Callaway C. W., Kelsey Sh. F., Hostler D. Association Between Poor Sleep, Fatigue, and Safety Outcomes in Emergency Medical Services Providers. *Prehosp Emerg Care*. 2012 Jan-Mar. Vol. 16 (1). P. 86–97. <https://doi.org/10.3109/10903127.2011.616261>.
2. Костенко Т. В. Особливості травматизму особового складу рятувальних підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану. *Актуальні питання охорони праці, цивільної та техногенної безпеки*. 2025. № 1(1). С. 35–44.
3. Аналіз стану виробничого травматизму серед осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту та працівників Головних управлінь ДСНС України в областях та м. Києві, підрозділів центрального підпорядкування, підприємств, установ, організацій сфери управління ДСНС та закладах вищої освіти із специфічними умовами навчання за 2023 рік, 2024 рік, 9 місяців 2025 року.
4. Про затвердження Порядку розслідування та ведення обліку нещасних випадків, що сталися з особами рядового і начальницького складу служби цивільного захисту : наказ Міністерства внутрішніх справ України від 12 березня 2024 р. № 154. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-24#Text>.
5. Dawson D., McCulloch K. Managing fatigue: It's about sleep. *Sleep Medicine Reviews*. 2021. Vol. 55. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2005.03.002>.

6. Marvin G., Schram B., Orr R., Canetti E. Occupation-Induced Fatigue and Impacts on Emergency First Responders: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2023. Nov 12. Vol. 20 (22). 7055. <https://doi.org/10.3390/ijerph20227055>.
7. Health impact of psychosocial hazards at work: an overview / Stavroula Leka, Aditya Jain. URL: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/40253b69-a533-4f27-af56-bdddbad63ec0/content>.
8. Федорчук-Мороз В. І., Бондарчук Л. Ф. Безпека праці в контексті впливу окремих чинників психічного здоров'я працівників в умовах воєнного стану. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2023. № 2 (11). С. 161–169. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-161-169>.
9. Mabila S. L., Murray J. H., Stahlman Sh. L., McQuistan A. A., Sheriff E. A. Incidence of Occupational Injuries Among Military Working Dog Handlers, 2016–2023. *Am J Ind Med*. 2025. Apr. Vol. 68 (4). P. 379–387. <https://doi.org/10.1002/ajim.23707>. Epub 2025 Jan 26.
10. International Labour Organization (ILO). Psychosocial risks, stress and fatigue at work. ILO Working Paper, 2021. URL: <https://www.ilo.org/resource/psychosocial-risks-and-stress-work>.
11. International Labour Organization (ILO). Working time and the future of work. Geneva: ILO, 2019 / використовується і в аналітиці 2020–2022 pp. URL: <https://www.ilo.org/publications/working-time-and-future-work>.
12. Мовмига Н. Є., Мезенцева І. О., Панчева Г. М. Попередження суб'єктивних причин виробничого травматизму в системі працевохоронного менеджменту. *Young Scientist*. 2022. № 1(101). С. 111–119. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2022-1-101-24>.
13. Сучасна кінологія: стан, проблеми, перспективи [Електронний ресурс] : матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 24–25 травня 2023 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. Харків, 2023. URL: <https://biotechuniv.edu.ua/nauka/konferentsiyi>.
14. Селюков В. С. Форми та методи організації роботи кінологів із собаками-рятувальниками. *Наукові записки. Серія: Право – Scientific notes. Series: Law*. Вип. 7. Спецвип. 2019. С. 75–80.
15. Мордюшенко С. (2019). Психологічний аналіз діяльності кінологів-рятувальників державної служби України з надзвичайних ситуацій. *Збірник наукових праць «Проблеми сучасної психології»*. 2019. № 20. <https://doi.org/10.32626/2227-6246.2013-20.%p>.
16. Bray Emily E., Cynthia M. Otto, Monique A. R. Udell Nathaniel J. Hall, Angie M. Johnston, Evan L. MacLean Enhancing the Selection and Performance of Working Dogs *Front. Vet. Sci.*, 12 May 2021. Sec. *Animal Behavior and Welfare*. 2021. Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.644431>.
17. Sarrafchi A., Matéa D.-S., Sydney P. D., de Zwaan N., Merckies K. Effect of human-dog interaction on therapy dog stress during an on-campus student stress buster event: *Applied Animal Behaviour Science*, August 2022. Vol. 253, 105659 ref. 52 ref. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105659>.
18. Про затвердження Положення про Кінологічну службу Державної служби України з надзвичайних ситуацій : наказ Міністерства внутрішніх справ України від 15.07.2016 № 675. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z1293-16?utm_source=chatgpt.com#Text.
19. Про затвердження Інструкції з організації діяльності кінологічних підрозділів ДСНС : наказ Міністерства внутрішніх справ України від 11.07.2018 № 597. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0896-18#Text>.
20. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо застосування кінологічних підрозділів ДСНС України під час проведення пошуково-рятувальних робіт : наказ ДСНС з основної діяльності від 17.09.2014 № 527. URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/44406__44406.
21. Про затвердження Положення про Оперативно-рятувальну службу цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій : наказ МВС України від 03.07.2014 № 631. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0853-14>.
22. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж : наказ МВС України від 26.04.2018 № 340. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18>.
23. Єрмакова К. С., Пінчук П. А. Особливості психологічної підготовки працівників кінологічних служб до виконання обов'язків під час проведення пошуково-рятувальних робіт. *Шляхи покращення професійного рівня працівників кінологічних служб*. Харків, 2018. С. 89–91.

REFERENCES:

1. Patterson, P. D, Weaver, M. D., Frank, R. C., Warner, C. W., Martin-Gill, Ch., Guyette, F. X., Fairbanks, R. J., Hubble, M. W., Songer, T. J., Callaway, C. W., Kelsey, Sh. F., & Hostler, D. (2012). Association Between Poor Sleep, Fatigue, and Safety Outcomes in Emergency Medical Services Providers. *Prehosp Emerg Care*, 16(1), 86–97. <https://doi.org/10.3109/10903127.2011.616261>.

2. Kostenko, T. V. (2025). Osoblyvosti travmatyzmu osobovoho skladu riatsuvalnykh pidrozdiliv DSNS Ukrainy v umovakh voiennoho stanu [Peculiarities of traumatism of personnel of rescue units of the DSNS of Ukraine in conditions of martial law]. *Aktualni pytannia okhorony pratsi, tsyvilnoi ta tekhnohennoi bezpeky*, 1(1), 35–44 [in Ukrainian].
3. Analiz stanu vyrobnychoho travmatyzmu sered osib riadovoho i nachalnytskoho skladu sluzhby tsyvilnoho zakhystu ta pratsivnykiv Holovnykh upravlin DSNS Ukrainy v oblastiakh ta m. Kyievi, pidrozdiliv tsentralnoho pidporiadkuvannya, pidpriemstv, ustanov, orhanizatsii sfery upravlinnia DSNS ta zakladakh vyshchoi osvity iz spetsyfichnymy umovamy navchannia za 2023 rik, 2024 rik, 9 misiatsiv 2025 roku [Analysis of the state of occupational injuries among ordinary and managerial personnel of the civil defense service and employees of the Main Departments of the State Emergency Service of Ukraine in the regions and the city of Kyiv, units of central subordination, enterprises, institutions, organizations of the State Emergency Service management sphere and higher education institutions with specific training conditions for 2023, 2024, 9 months of 2025] [in Ukrainian].
4. Pro zatverdzhennia Poriadku rozsliduvannya ta vedennia obliku neshchasnykh vypadkiv, shcho stalysia z osobamy riadovoho i nachalnytskoho skladu sluzhby tsyvilnoho zakhystu: nakaz Ministerstva vnutrishnikh sprav Ukrainy vid 12 bereznia 2024 r. № 154 [On approval of the Procedure for the investigation and management of accidental cases, which became the subjects of the regular and leading ranks of the civil defense service: Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated March 12, 2024 No. 154]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-24#Text> [in Ukrainian].
5. Dawson, D., & McCulloch, K. (2021). Managing fatigue: It's about sleep. *Sleep Medicine Reviews*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2005.03.002>.
6. Marvin, G., Schram, B., Orr, R., & Canetti, E. (2023). Occupation-Induced Fatigue and Impacts on Emergency First Responders: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*, Nov 12, 20(22), 7055. <https://doi.org/10.3390/ijerph20227055>.
7. Health impact of psychosocial hazards at work: an overview / Stavroula Leka, Aditya Jain. Retrieved from <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/40253b69-a533-4f27-af56-bdddbad63ec0/content>.
8. Fedorchuk-Moroz, V. I., & Bondarchuk, L. F. (2023). Bezpeka pratsi v konteksti vplyvu okremykh chynnykiv psykhichnoho zdorovia pratsivnykiv v umovakh voiennoho stanu [Occupational safety in the context of the impact of specific factors of mental health of workers in conditions of martial law]. *Naukovyi visnyk DonNTU*, 2(11), 161–169. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-161-169> [in Ukrainian].
9. Mabila, S. L., Murray, J. H., Stahlman, Sh. L., McQuistan, A. A., & Sheriff, E. A. (2025). Incidence of Occupational Injuries Among Military Working Dog Handlers, 2016-2023. *Am J Ind Med.*, 68(4), 379–387. <https://doi.org/10.1002/ajim.23707>
10. International Labour Organization (ILO). Psychosocial risks, stress and fatigue at work. ILO Working Paper, 2021. Retrieved from <https://www.ilo.org/resource/psychosocial-risks-and-stress-work>.
11. International Labour Organization (ILO). Working time and the future of work. Geneva: ILO, 2019 / vykorystovuietsia i v analitytsi 2020–2022 rr. Retrieved from <https://www.ilo.org/publications/working-time-and-future-work>.
12. Movmyha, N. Ye., Mezentseva, I. O., & Pancheva, H. M. (2022). Poperedzhennia subiektyvnykh prychnyn vyrobnychoho travmatyzmu v systemi pratseokhoronnoho menedzhmentu [Prevention of subjective causes of industrial trauma in the system of occupational health and safety management]. *Young Scientist*, 1(101), 111–119. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2022-1-101-24> [in Ukrainian].
13. *Suchasna kinolohiia: stan, problemy, perspektyvy* [Contemporary cinema: state, problems, prospects]: materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii, 24–25 travnia 2023 r. Derzh. biotekhnolohichniy un-t. Kharkiv, 2023. Retrieved from <https://biotechuniv.edu.ua/nauka/konferentsiyi> [in Ukrainian].
14. Seliukov, V. S. (2019). Formy ta metody orhanizatsii roboty kinolohiv iz sobakamy-riatsuvalnykamy [Forms and methods of organizing the work of film professionals and rescue dogs]. *Naukovi zapysky. Seriya: Pravo – Scientific notes. Series: Law*, 7, Spetsvypusk, 75–80 [in Ukrainian].
15. Mordiushenko, S. (2019). Psykholohichniy analiz diialnosti kinolohiv-riatsuvalnykiv derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii [Psychological analysis of the activities of film critics and rescuers of the state service of Ukraine in extraordinary situations]. *Zbirnyk naukovykh prats "Problemy suchasnoi psykholohii"*, 20. <https://doi.org/10.32626/2227-6246.2013-20.%p> [in Ukrainian].
16. Bray Emily, E., Cynthia, M. Otto, & Monique, A. R. Udell Nathaniel J. Hall, Angie M. Johnston, Evan L. (2021). MacLean Enhancing the Selection and Performance of Working DogsFront. Vet. Sci., 12 May 2021. Sec. *Animal Behavior and Welfare*, 8. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.644431>.

17. Sarrafchi, A., Matéa, D.-S., Sydney, P. D., de Zwaan, N., & Merckies, K. (2022). Effect of human-dog interaction on therapy dog stress during an on-campus student stress buster event: *Applied Animal Behaviour Science*, 253, 105659 ref. 52 ref. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105659>.

18. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro Kinolohichnu sluzhbu Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii: nakaz Ministerstva vnutrishnikh sprav Ukrainy vid 15.07.2016 № 675 [On the approval of the Regulations for the Cinema Service of the State Service of Ukraine in exceptional circumstances: Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated July 15, 2016 No. 675]. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z1293-16?utm_source=chatgpt.com#Text [in Ukrainian].

19. Pro zatverdzhennia Instruksii z orhanizatsii diialnosti kinolohichnykh pidrozdiliv DSNS Nakaz Ministerstva vnutrishnikh sprav Ukrainy vid 11.07.2018 № 597 [On approval of the Instructions on the organization of activities of cinematographic distributors of the SESU: Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated 11.07.2018 No. 597]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0896-18#Text> [in Ukrainian].

20. Pro zatverdzhennia Metodichnykh rekomendatsii shchodo zastosuvannia kinolohichnykh pidrozdiliv DSNS Ukrainy pid chas provedennia poshukovo-riatuvalnykh robot: nakaz DSNS z osnovnoi diialnosti vid 17.09.2014 № 527 [For approval of Methodological Recommendations, it is necessary to use the kinological divisions of the SESU during search and rescue operations: Order of the SESU of the main activity dated 17.09.2014 No. 527]. Retrieved from https://zakononline.com.ua/documents/show/44406__44406_10 [in Ukrainian].

21. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro Operativno-riatuvalnu sluzhbu tsyvilnoho zakhystu Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii: nakaz MVS Ukrainy vid 03.07.2014 № 631 [For approval of the Regulations for the Operational and Rescue Service of the Civil Defense of the State emergency service of Ukraine: Order of the State Security Service of Ukraine dated 03.07.2014 No. 631]. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0853-14_11 [in Ukrainian].

22. Pro zatverdzhennia Statutu dii u nadzvychainykh sytuatsiakh orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operativno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu ta Statutu dii orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operativno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu pid chas hasinnia pozhezh: nakaz MVS Ukrainy vid 26.04.2018 № 340 [For approval of the Statute of the Organizations of the Administration and Divisions of the Operational-Rescue Service of the Civil Defense and the Statute of the Organizations of the Administration and Divisions of the Operational-Rescue Service of the Civil Defense during Firefighting: Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated 26.04.2018 No. 340]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18> [in Ukrainian].

23. Yermakova, K. S., & Pinchuk, P. A. (2018). Osoblyvosti psykhologichnoi pidhotovky pratsivnykiv kinolohichnykh sluzhb do vykonannia oboviazkiv pid chas provedennia poshukovo-riatuvalnykh robot. Shliakhy pokrashchennia profesiinoho rivnia pratsivnykiv kinolohichnykh sluzhb [Features of the psychological preparation of film service workers for the performance of duties during search and rescue operations. Ways to improve the professional level of film service workers]. Kharkiv, 89–91 [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 16.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026

НОТАТКИ

Наукове видання

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКИ

Серія: Технічні науки

№ 6, 2026

Коректура • Ірина Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Наталія Кузнєцова

Дата розміщення онлайн: 16.03.2026. Дата друку: 23.03.2026.
Формат 60x84/8. Гарнітура Arimo. Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 32,55. Замов. № 0226/144. 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.