

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

# НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКИ

Серія: Технічні науки

№ 1, 2024



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2024

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

**Грибков Е. П. (головний редактор)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Кухар В. В. (заступник головного редактора)** – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Малій Х. В. (відповідальний секретар)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»

### Члени редакційної колегії:

#### 132 – Матеріалознавство

**Грудкіна Н. С.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Кострижев А. Г.** – PhD, Університет Квінсленду, Австралія  
**Липчанський О. О.** – PhD, Гірничо-металургійна академія ім. Станіслава Сташиця, Польща  
**Пашинська О. Г.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»

#### 133 – Галузеве машинобудування

**Бундза О. З.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії, Національний університет водного господарства та природокористування  
**Голотюк М. В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії, Національний університет водного господарства та природокористування  
**Гурковська С. С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»

#### 136 – Металургія

**Wu Kaiming** – PhD, професор, Уханський університет науки і технологій, Китай  
**Синегін С. В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургії чавуну і сталі, Український державний університет науки і технологій

#### 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

**Бубликов А. В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірвальних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
**Койфман О. О.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Папаїка Ю. А.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
**Разживін О. В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Сімкін О. І.** – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Суботін О. В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Хілов В. С.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»

#### 183 – Технології захисту навколишнього середовища

**Галіч Г. В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет

**Максимова Н. М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Орлінська О. В.** – доктор геологічних наук, професор, професор кафедри гірничої справи, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Пікареня Д. С.** – доктор геологічних наук, професор, професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»

#### 184 – Гірництво

**Григор'єв Ю. І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет  
**Ковров О. С.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
**Луценко С. О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет  
**Рудаков Д. В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гідрогеології та інженерної геології, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
**Сахно І. Г.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри розробки родовищ корисних копалин, Донецький національний технічний університет  
**Сахно С. В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геотехнічної інженерії, Донецький національний технічний університет

#### 263 – Цивільна безпека

**Болібрух Б. В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри цивільної безпеки, Національний університет «Львівська політехніка»  
**Демчук Г. В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Кружилко О. Є.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Майстренко В. В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля, Технічний Університет «Метінвест Політехніка»  
**Полукаров О. І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
**Полукаров Ю. О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
**Резнік Д. В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
**Чеберячко С. І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

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». 2024. № 1. 126 с.

## ЗМІСТ

### МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- Міхєєнко Денис Юрійович, Грудкіна Наталія Сергіївна**  
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТКОЮ  
ВІДНОСНО ТОВСТИХ ДВОШАРОВИХ БІМЕТАЛЕВИХ ЛИСТОВИХ ЗАГОТІВОК  
З МЕХАНІЧНИМ З'ЄДНАННЯМ.....7
- Пашинський Володимир Вікторович, Пашинська Олена Генріхівна,  
Бойко Ігор Олександрович**  
ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ РІВЕНЬ МІЦНОСТІ  
ТА ПЛАСТИЧНОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ.....13

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- Налобіна Олена Олександрівна, Голотюк Микола Віталійович, Бундза Олег Зіновійович**  
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ  
НА РОБОТУ ПІРНИЧИХ МАШИН.....20
- Цимбал Богдан Михайлович, Сичов Володимир Вікторович**  
ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИЗАЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА.....25

### МЕТАЛУРГІЯ

- Єфімова Вероніка Гаріївна, Смірнов Олексій Миколайович, Смірнов Юрій Олексійович**  
ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ ЧАСТИНОК  
ГЛИНОЗЕМУ У РАФІНУВАЛЬНОМУ ШЛАКУ ПРОМІЖНОГО КОВША.....32
- Кухар Володимир Валентинович, Малій Христина Василівна,  
Кустіков Владислав Валерійович**  
АНАЛІЗ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ФУТЕРІВКИ  
ІНДУКЦІЙНИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ.....38
- Timoshenko Sergii Mykolaiovych**  
NUMERICAL MODELING OF ENERGY EFFICIENT SOLUTIONS  
OF CARBON REMOVAL AND SLAG MODE IN ELECTRIC ARC FURNACE.....45

### АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

- Бублікєв Андрій Вікторович, Гурбанєв Руслан Аламдарєвич, Рибачук Ілля Сергійєвич**  
ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРАЛЬНОЮ МАШИНОЮ  
З УРАХУВАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК» (ЧАСТИНА ПЕРША).....51
- Разживін Олексій Валерійєвич, Олійник Ігор Олександрєвич,  
Пєтєцький Сергій Вікторович, Бєєєв Глєб Романєвич**  
НЕЧІТКА СУПЕРВІЗОРНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ  
ТИСКУ ПАРУ КОТЛОАГРЕГАТУ.....58
- Khilov Victor Serhiiovych**  
AUTOMATED CONTROL OF DRIVES FOR OPEN-PIT DRILLING RIGS.....67

## ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

|  |    |
|--|----|
| <b>Єсіпова Наталія Борисівна, Шарамок Тетяна Сергіївна</b><br>ТЕХНОЛОГІЯ СУМІСНОГО ВИРОЩУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ АКВАКУЛЬТУРИ<br>В УМОВАХ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВОДИ.....  | 73 |
| <b>Пікареня Дмитро Сергійович, Орлінська Ольга Вікторівна,<br/>Рудаков Леонід Миколайович, Гапіч Геннадій Васильович</b><br>ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ<br>ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ ДАМБИ ХВОСТОСХОВИЩА ..... | 82 |

## ГІРНИЦТВО

|   |    |
|---|----|
| <b>Григор'єв Ігор Євгенійович, Григор'єв Юліан Ігорович, Швець Єгор Миколайович,<br/>Луценко Сергій Олександрович, Лукін Антон Юрійович</b><br>ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВИЙМАЛЬНО-НАВАНТАЖУВАЛЬНОГО<br>ОБЛАДНАННЯ В УМОВАХ ТОВ «ЕРИСТІВСЬКИЙ ГЗК»..... | 90 |
| <b>Сахно Іван Георгійович, Сахно Світлана Володимирівна</b><br>СПРЯМОВАНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД НЕВИБУХОВИМИ<br>РУЙНУЮЧИМИ СУМІШАМИ.....  | 96 |

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

|   |     |
|---|-----|
| <b>Кружилко Олег Євгенович, Чеберячко Сергій Іванович, Подкопаєв Сергій Вікторович,<br/>Володченкова Наталія Валеріївна, Бехтер Олександр Анатолійович</b><br>ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ З ПОЛІПШЕННЯ УМОВ ПРАЦІ<br>(НА ПРИКЛАДІ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ ЗАПИЛЕНОСТІ)..... | 103 |
| <b>Кружилко Олег Євгенович, Чеберячко Юрій Іванович,<br/>Гусаков Володимир Володимирович</b><br>РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ДЛЯ РОБІТ НА ВИСОТІ.....  | 109 |
| <b>Юсубова Лейла Яківна, Костенко Віктор Климентович</b><br>ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЗАХИСНОГО ОДЯГУ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ<br>ГОМЕОСТАЗУ МЕТАЛУРГІВ.....   | 118 |

## CONTENTS

### MATERIALS SCIENCE

**Mikheienko Denys, Hrudkina Natalia**

THEORETICAL STUDIES OF THE ROLLED MANUFACTURING PROCESS  
OF THICK TWO-LAYER BIMETALLIC SHEET BILLS WITH MECHANICAL CONNECTION.....7

**Pashynskyi Volodymyr, Pashynska Olena, Boyko Ihor**

STUDY OF STRUCTURAL FACTORS WHICH DETERMINE THE LEVEL OF STRENGTH  
AND PLASTICITY OF DUCTILE CAST IRON..... 13

### INDUSTRIAL ENGINEERING

**Nalobina Olena, Holotiuk Mykola, Bundza Oleg**

STUDY OF THE INFLUENCE OF DYNAMIC LOADS ON THE OPERATION  
OF MINING MACHINES..... 20

**Tsymbol Bohdan, Sychov Volodymyr**

FEATURES OF ROBOTISATION OF METALLURGICAL PRODUCTION.....25

### METALLURGY

**Yefimova Veronika, Smirnov Oleksiy, Smirnov Yuri**

DETERMINATION OF THE KINETIC PARAMETERS OF THE DISSOLUTION PROCESS  
OF ALUMINUM PARTICLES IN THE REFINING SLAG OF THE INTERMEDIATE BUCKET.....32

**Kukhar Volodymyr, Malii Khrystyna, Kustikov Vladyslav**

ANALYSIS AND SYSTEMATIZATION OF WAYS TO INCREASE THE STABILITY  
OF THE LINING OF INDUCTION STEEL MELTING FURNACES..... 38

**Timoshenko Sergii**

NUMERICAL MODELING OF ENERGY EFFICIENT SOLUTIONS  
OF CARBON REMOVAL AND SLAG MODE IN ELECTRIC ARC FURNACE.....45

### AUTOMATION, COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES AND ROBOTICS

**Bublikov Andrii, Gurbanov Ruslan, Rybachuk Illia**

FEATURES OF THE WASHING MACHINE AUTOMATIC CONTROL PROCESS TAKING  
INTO ACCOUNT THE SMART HOME CONCEPT .....51

**Razhyvin Oleksii, Oleiinyk Ihor, Pototskyi Serhii, Bobov Hlib**

FUZZY SUPERVISORY SYSTEM OF AUTOMATED REGULATION OF STEAM PRESSURE  
OF BOILER UNIT.....58

**Khilov Victor**

AUTOMATED CONTROL OF DRIVES FOR OPEN-PIT DRILLING RIGS.....67

### ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES

**Yesipova Nataliia, Sharamok Tetiana**

TECHNOLOGY OF CO-CULTIVATION OF AQUACULTURE OBJECTS IN THE CONDITIONS  
OF WATER RECIRCULATION.....73

**Pikarenia Dmytro, Orlinska Olha, Rudakov Leonid, Hapich Hennadii**  
EXPERIENCE IN APPLYING GEOPHYSICAL METHODS TO ASSESS  
THE TECHNICAL CONDITION OF THE TAILINGS DAM.....82

**MINING**

**Hryhoriev Ihor, Hryhoriev Yulian, Shvets Ehor, Lutsenko Serhii, Lukin Anton**  
STUDY OF THE EFFICIENCY OF USE OF EXTRACTION AND LOADING EQUIPMENT  
IN THE CONDITIONS OF “YERISTIVSKY MPP” LTD.....90

**Sakhno Ivan, Sakhno Svitlana**  
DIRECTIONAL EXPLOSIVE-FREE BREAKAGE OF ROCK BY SOUNDLESS CHEMICAL  
DEMOLITION AGENTS.....96

**CIVIL SECURITY**

**Kruzhilko Oleg, Cheberyachko Serhii, Podkopaiev Serhii, Volodchenkova Nataliia,  
Bekhter Oleksandr**  
JUSTIFICATION OF MEASURES TO IMPROVE WORKING CONDITIONS (ON THE EXAMPLE  
OF DUST MONITORING DATA).....103

**Kruzhilko Oleg, Cheberyachko Yuriy, Gusakov Volodymyr**  
CALCULATION OF COSTS OF SAFETY MEASURES FOR WORK AT HEIGHT.....109

**Yusubova Leila, Kostenko Viktor**  
THE INFLUENCE OF THE SURFACE LAYER OF PROTECTIVE CLOTHING ON ENSURING  
THE HOMEOSTASIS OF METALLURGISTS.....118

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.771.01: 621.771.23: 621.777.8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-1>

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТКОЮ ВІДНОСНО ТОВСТИХ ДВОШАРОВИХ БІМЕТАЛЕВИХ ЛИСТОВИХ ЗАГОТІВОК З МЕХАНІЧНИМ З'ЄДНАННЯМ

**Міхєєнко Денис Юрійович,**

кандидат технічних наук,

доцент кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-1966-0618

**Грудкіна Наталія Сергіївна,**

доктор технічних наук,

професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-0914-8875

Стаття присвячена розширенню сортаменту, підвищенню якості і зниженню собівартості під час виробництва біметалевих відносно товстих двошарових композицій на основі розвитку методів розрахунку в прокатці біметалевих листів з механічним з'єднанням складників. Засновуючись на чисельному рекурентному рішенні кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги, розроблено математичну модель напружено-деформованого стану металу, що виникає під час виробництва біметалевих листів за допомогою прокатки м'якого матеріалу на твердій підкладці з поздовжніми пазами. Цей метод дає змогу досліджувати та прогнозувати напружено-деформований стан металу під час процесу прокатки, коли м'який матеріал прокатується на твердій підкладці з поздовжніми пазами. Врахування чисельного рекурентного рішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги дає можливість точно моделювати різні аспекти цього процесу, такі як розподіл напруг та деформацій у матеріалі. Проведено двовимірний аналіз напружено-деформованого стану металу складової частини, що плакує, використовуючи метод полів ліній ковзання. Цей метод дає змогу повністю врахувати неоднорідність розподілу напруг та деформацій по висоті кожного окремого перерізу зони пластичного формозміни металу. Отримані результати аналізу збіглися з результатами чисельного кінцевого математичного моделювання. Розроблено математичну модель, реалізовану в пакеті кінцево-елементного моделювання Abaqus Student Edition, для оцінки достовірності отриманих теоретичних рішень. Порівняння цих даних з результатами чисельного моделювання та методу полів ліній ковзання показало достатню збіжність, що вказує на можливість використання одновимірної математичної моделі в системі автоматизованого проектування технологічних режимів та обладнання. Застосування варіаційного підходу у розрахунку напружено-деформованого стану металу під час прокатки біметалевих композицій дає змогу врахувати поздовжню течію металу. Ця модель дає можливість прогнозувати глибину затікання металу м'якої складової частини в поздовжні пази твердої підкладки і, таким чином, надати практичні рекомендації щодо вибору розмірів заготівлі шару, що плакує.

**Ключові слова:** відносно товсті біметалеві листи, механічне з'єднання складових частин, напружено-деформований стан, математичне моделювання.

**Mikheienko Denys, Hrudkina Natalia. Theoretical studies of the rolled manufacturing process of thick two-layer bimetallic sheet bills with mechanical connection**

The article is devoted to the expansion of the assortment, improvement of quality and reduction of cost in the production of bimetallic relatively thick two-layer compositions based on the development of calculation methods and rolling of bimetallic sheets with mechanical connection of components. Based on the numerical recurrent solution of the finite-difference form of the condition of static equilibrium, a mathematical model – the deformed state of the metal, which occurs during the production of bimetallic sheets by rolling soft material on a hard substrate with longitudinal grooves. This method allows you to study and predict the stress-strain state

of the metal during the rolling process, when the soft material is rolled on a hard substrate with longitudinal grooves. Taking into account the numerical recurrent solution of the finite-difference form of the condition of static equilibrium allows you to accurately model various aspects of this process, such as the distribution of stresses and strains in the material. A two-dimensional analysis of the stress-strain state of the metal of the weeping component was carried out using the slip line field method. This method allows you to fully take into account the inhomogeneity of the distribution of stresses and strains along the height of each individual section of the zone of plastic deformation of the metal. The obtained results of the analysis coincided with the results of numerical finite mathematical modeling. A mathematical model implemented in the Abaqus Student Edition finite element modeling package was developed to assess the reliability of the obtained theoretical solutions. A comparison of these data with the results of numerical modeling and the method of slip line fields showed sufficient convergence, which indicates the possibility of using a one-dimensional mathematical model in the system of automated design of technological modes and equipment. The use of the variational approach in the calculation of the stress-strain state of the metal during rolling of bimetallic compositions allows taking into account the longitudinal flow of the metal. This model makes it possible to predict the depth of penetration of the metal of the soft component into the longitudinal grooves of the hard substrate and, thus, to provide practical recommendations for choosing the dimensions of the workpiece of the cladding layer.

**Key words:** relatively thick bimetal sheets, mechanical link of the components, stress-strain state, mathematical simulation.

Підвищення техніко-економічних показників металургійного і заготовчого комплексів України у контексті їх інтеграції у світове промислове виробництво є ключовим завданням для забезпечення конкурентоспроможності та стабільності галузі. Розширення сортаменту продукції і зниження собівартості, зокрема через освоєння виробництва біметалевих листів з механічними з'єднаннями, відображає потребу в постійному технологічному розвитку.

Процеси прокатки є одними з найбільш перспективних технологій для досягнення цієї мети. Вони можуть забезпечити високу якість та точність виготовлення продукції, що є важливим в умовах конкурентного ринку. Однак необхідно провести широкий спектр досліджень для підвищення наукової обґрунтованості та ефективності технічних рішень. Це допоможе оптимізувати процеси виробництва, знизити витрати та підвищити якість продукції.

Нині з'явилася потреба у відносно товстому біметалевому листі з поєднаннями матеріалів «мідь + сталь», «титан + сталь», «зносостійка сталь + конструкційна сталь», «корозійностійка сталь + конструкційна сталь», «бронза + сталь» тощо. Ці типорозміри необхідні для виробництва кристалізаторів машин безперервного лиття заготовок, захисних планок станів прокатних станів, підшипників ковзання тощо. Водночас традиційні способи виробництва відносно товстих біметалічних листів мають цілу низку недоліків, тому за основу нової технології було взято виробництво двошарової біметалічної композиції з утворенням механічних зв'язків між складовими [1, с. 1]. В одній із складових біметалічної композиції, яка в процесі прокатки пластично не деформується і називається твердою, виконані поздовжні пази різної форми. В результаті спільної прокатки

(рис. 1) відбувається затікання м'якої складової в поздовжні пази твердої підкладки і утворюється надійне механічне з'єднання складових, що забезпечує необхідну міцність на відрив за рахунок сил зовнішнього тертя на бокових контактних поверхнях пазів або за рахунок рознесеного хвоста «ластівки».

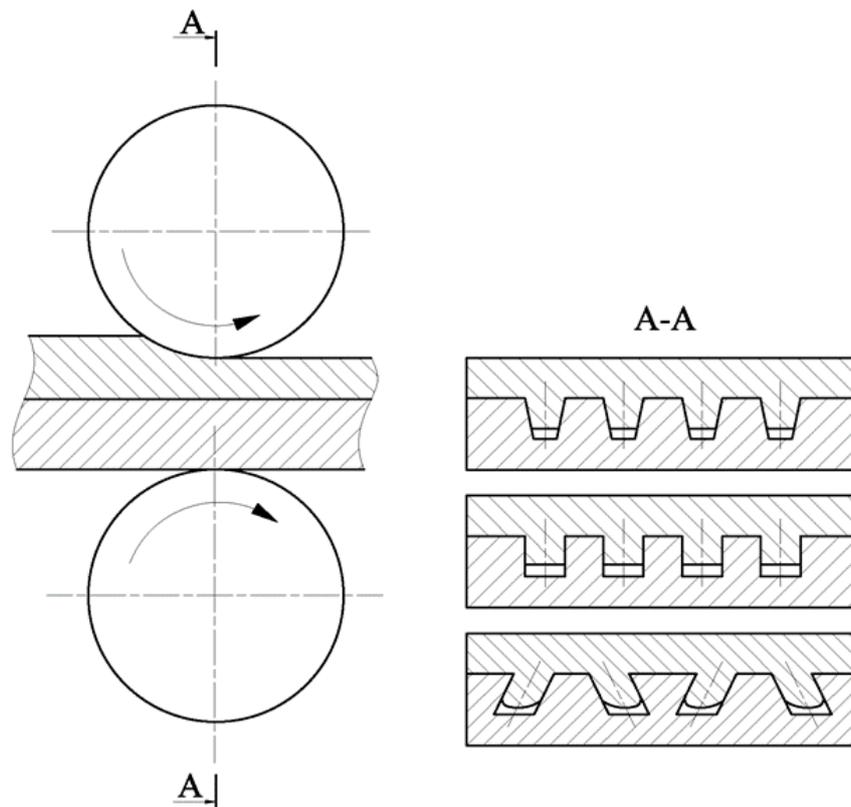
Водночас недостатнє вивчення цієї технології разом з відсутністю досвіду її промислового освоєння робить актуальним проведення відповідних теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на уточнення вихідних передумов, розроблення методів розрахунку та конкретних практичних рекомендацій.

Крім відносної простоти виробництва, до переваг технології (рис. 1) слід віднести можливість з'єднання складових з різних матеріалів, а також можливість використання традиційного обладнання станів полистової прокатки.

Механіка процесу з'єднання двох листів за рахунок затікання матеріалу, що плакує, в попередньо виконані пази, що плакується, дуже складна, оскільки важко вибрати оптимальний метод за поєднанням точності та трудомісткості. Інакше досягнення похибки, скажімо, в 2% проти 5–7% до цього може обійтися збільшенням трудомісткості вдвічі. Тому математична модель будується з урахуванням реальності виконання й практичного застосування та можливості розрахунку з використанням ЕОМ.

Враховуючи складний характер перебігу металу у зоні пластичного формозміни, вирішуємо завдання з використанням чотирьох теоретичних методів, причому вони взаємно доповнюють один одного.

Перший – метод чисельного рекурентного вирішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного обсягу зони пластичного формозміни



**Рис. 1. Технологічна схема отримання прокаткою біметалічної листової композиції з механічним зв'язком**

металу – дає змогу врахувати реальний характер розподілу геометричних характеристик, механічних властивостей та умов контактної тертя по довжині зони пластичної формозміни металу [2, с. 42].

Другий – метод полів ліній ковзання – дає змогу врахувати двовимірний характер пластичної формозміни металу, що наявний за його перетікання з плоскої зони, де на метал впливає прокатний валок, в клинову порожнину, виконану на листі, що плакується [3, с. 18].

Третій – метод кінцевих елементів – дає змогу отримувати найточнішу картину деформованого металу під час утворення механічного зв'язку між складовими біметалічної композиції [3, с. 115].

Четвертий – варіаційний метод – дає змогу врахувати тривимірний характер пластичної формозміни металу під час утворення механічного зв'язку [4, с. 28].

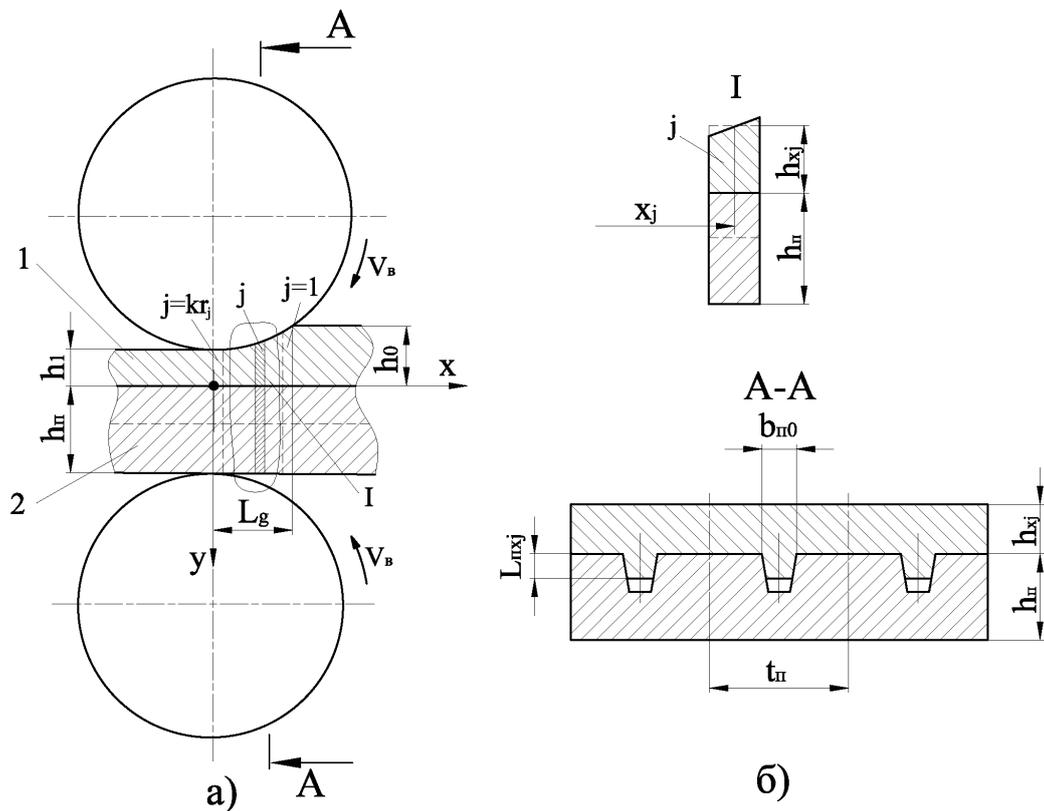
Великі перспективи має спосіб виробництва прокаткою щодо товстих біметалічних листів з механічним зв'язком між складовими, в якому одна зі складових композиції пластично деформується і затікає в поздовжні похилі пази твердої підкладки. Однак розрахунок напружено-деформованого металу під час реалізації

технології є достатньо складним. Тому для розрахунку енергосилових параметрів було прийнято рішення про заміну форми паза на вертикальну клинову порожнину, що повторюється (рис. 2). Передбачається, що розрахункові значення напружень і зусиль у цьому разі несуттєво відрізняться від реальних.

За аналогією з традиційними схемами процесів гарячої і холодної прокатки в основу математичної моделі, що розробляється, було покладено чисельне рекурентне рішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги виділених елементарних обсягів металу в зоні його пластичної формозміни.

Загалом отримані аналітичні залежності разом з відомими рішеннями щодо визначення механічних властивостей різних металів та сплавів в умовах їх гарячого та холодного деформування склали повний алгоритм з автоматизованого розрахунку напружено-деформованого стану під час реалізації процесу виробництва двошарових біметалічних листів з механічним зв'язком шляхом прокатки складової, що плакує, на недеформованій підкладці з поздовжніми клиновими пазами.

Аналогічний двовимірний аналіз проведено на основі методу полів ліній ковзання, що дає



**Рис. 2.** Розрахункова схема процесу прокатки біметалічної композиції із затіканням металу відносно м'якої пластично деформованої складової 1 у відносно тонку клиноподібну порожнину недеформованої підкладки 2



**Рис. 3.** Результати кінцево-елементного моделювання затікання в поздовжні пази

змогу повною мірою врахувати неоднорідність розподілу та напруги деформації по висоті кожного окремого перерізу зони пластичного формозміни металу. При цьому якісно одержані результати повністю відповідали аналогічним результатам чисельного кінцево-різного математичного моделювання. Зокрема, було встановлено, що збільшення коефіцієнтів зовнішнього контактного тертя та кутів нахилу бічних поверхонь поздовжніх клинових пазів недеформованої підкладки однозначно приводить до підвищення рівнів енергосилових параметрів досліджуваної технологічної схеми процесу прокатки. Якісно значення сили прокатки на 10–15% нижче, ніж аналогічні результати, отримані для тих самих умов реалізації на основі чисельного кінцево-різницього

підходу. Зазначене свідчить про достатню відповідність отриманим теоретичним рішенням.

Задля ще однієї критеріальної оцінки ступеня достовірності отриманих з використанням кінцево-різницьових підходів теоретичних рішень було виконано кінцево-елементне математичне моделювання напружено-деформованого стану металу складової 1, що прокочується під час його затікання поздовжні пази пластично недеформованої підкладки 2. Безпосередні розрахунки шляхом кінцевих елементів проводилися з використанням програмного комплексу ABAQUS Student Edition (рис. 3).

Основним допущенням під час аналізу напружено-деформованого стану металу плакувальної складової на основі перерахованих методів є відсутність урахування поздовжньої

пластичної формозміни металу цієї складової, що впливає на вибір її початкової довжини, що визначає об'єм подальшого відрізання і, як наслідок, коефіцієнт виходу придатної металопродукції.

Цей фактор враховується на основі варіаційних підходів до чисельної рекурентної реалізації, заснованої на кінцево-різницевому аналізі потужностей всіх опорів деформації в рамках кожного виділеного елементарного об'єму металу в зоні його пластичної формозміни. Вибрана схема інтегрального осередку деформації показана на рис. 4.

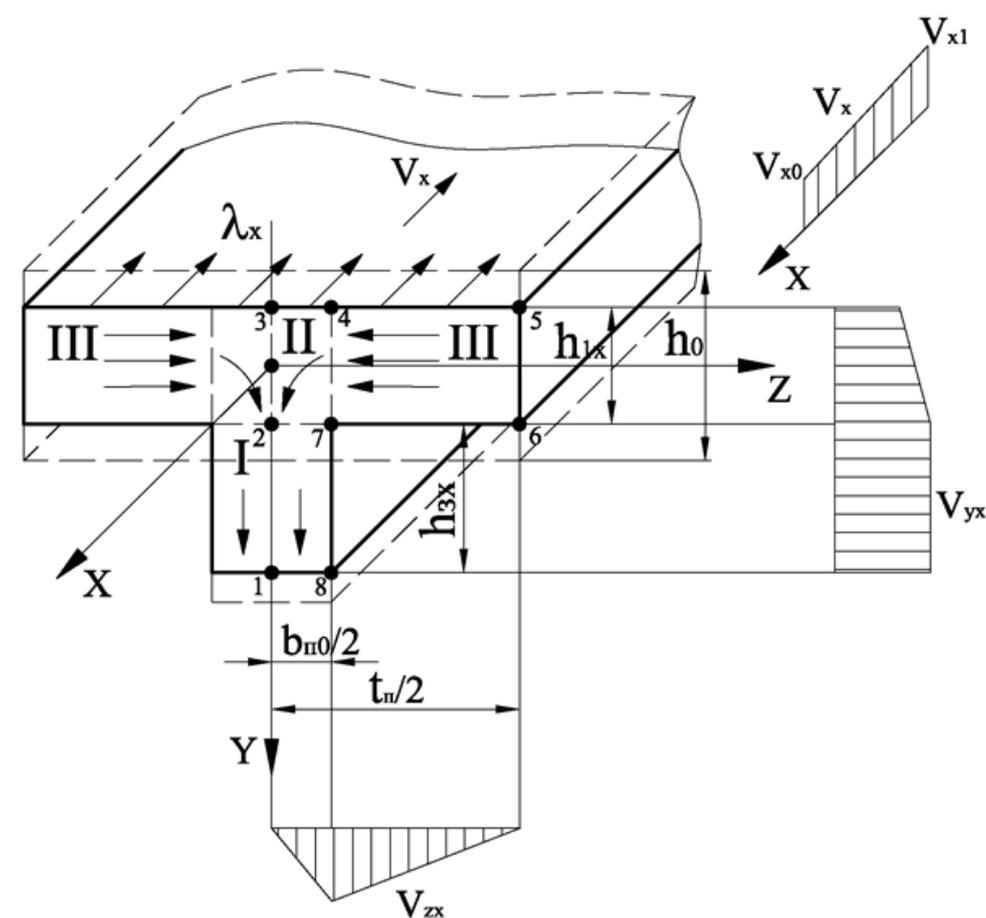
Загалом отримані аналітичні залежності склали повний алгоритм автоматизованого прогнозування глибини затікання металу м'якої складової в поздовжні пази твердої підкладки в процесі прокатки відносно товстих біметалічних листів.

Доходимо таких висновків:

- на основі чисельних методів – чисельного рекурентного рішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного обсягу, а також методу полів ліній ковзання, методу кінцевих елементів – розроблено математичні моделі напружено-деформованого стану металу, що спостерігається під час виробництва біметалевих листів на основі прокатки м'якого матеріалу твердої підкладки з поздовжніми пазами;

- на основі варіаційного підходу сформульовано та вирішено завдання з обліку поздовжнього перебігу м'якої складової та прогнозування глибини затікання металу в паз у процесі прокатки;

- отримані математичні моделі можуть бути використані для розроблення алгоритмів та програмних засобів, за допомогою яких визначено значення енергосилових параметрів прокатки біметалічної композиції.



**Рис. 4. Розрахункова схема поперечного перерізу осередку деформації під час прокатки біметалічної композиції затіканням металу відносно м'якої складової в щілинну порожнину підкладки, що не деформується**

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Патент 21238 України МПК В 23 К 20/04. Спосіб виробництва двошарових біметалевих листових композицій / В.А. Федорінов, О.В. Сатонін, А.О. Сатонін, Д.Ю. Міхеєнко; Донбаська державна машинобудівна академія. № 2006 07687; заявл. 10.07.06; опубл. 15.03.07, Бюл. № 3. 8 с.
2. Кулік Т.О. Виробництво листового металопрокату з використанням режимів теплового деформування. *Перспективи розвитку, розширення сфери використання та вдосконалення технологій і обладнання*: монографія. Краматорськ: ДДМА, 2020. 128 с. ISBN 978-966-379-958-2.
3. Калюжний В.Л. Комп'ютерні методи моделювання процесів виготовлення конструкцій літальних апаратів: конспект лекцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 176 с.
4. Конспект лекцій з дисципліни «Методи аналізу, моделювання та оптимізації процесів ОМТ». Ч. 2: Методи моделювання для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 136 «Металургія» за освітньо-науковою програмою «Обробка металів тиском» / укл. С.В. Єршов. Кам'янське: ДДТУ, 2016. 76 с.

**REFERENCES:**

1. Fedorinov V.A., Satonin O.V., Satonin A.O., Mikhieienko D.Yu. (2006). Patent 21238 Ukrainy MPK V 23 K 20/04. Sposib vyrobnytstva dvosharovykh bimetalovykh lystovykh kompozytsii [Patent 21238 of Ukraine IPC V 23 K 20/04. The method of production of two-layer bimetallic sheet compositions]. Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia. № 2006 07687; zaiavl. 10.07.06; opubl. 15.03.07, Biul. № 3. 8 s. [in Ukrainian]
2. Kulik, T.O. (2020). Vyrobnytstvo lystovoho metaloprokatu z vykorystanniam rezhymiv teploho deformuvannia. *Perspektyvy rozvytku, rozshyrennia sfery vykorystannia ta vdoskonalennia tekhnolohii i obladnannia: monohrafiia* [Production of rolled sheet metal using modes of warm deformation. Prospects for development, expansion of the scope of use and improvement of technologies and equipment]. Kramatorsk: DDMA. 128 s. ISBN 978-966-379-958-2. [in Ukrainian]
3. Kaliuzhnyi V.L. (2022). Kompiuterni metody modeliuвання protsesiv vyhotovlennia konstrukttsii litalnykh aparativ: konspekt lekttsii [Computer modeling methods of aircraft construction manufacturing processes]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 176 s. [in Ukrainian]
4. Yershov S.V. (ukl.) (2016). Konspekt lekttsii z dystsypliny "Metody analizu, modeliuвання ta optymizatsii protsesiv OMT". Ch. 2: Metody modeliuвання dlia zdobuvachiv vyshchoi osvity druhoho (mahisterskoho) rivnia zi spetsialnosti 136 "Metalurhiia" za osvitno-naukovoiu prohramoiu "Obrobka metaliv tyskom" [Synopsis of lectures on the discipline "Methods of analysis, modeling and optimization of OMT processes". Part 2: Modeling methods for students of higher education of the second (master's) level in the specialty 136 "Metallurgy" under the educational and scientific program "Processing of metals by pressure"]. Kamianske: DDTU. 76 s. [in Ukrainian]

УДК 621.74:669.13

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-2>

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ РІВЕНЬ МІЦНОСТІ ТА ПЛАСТИЧНОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

**Пашинський Володимир Вікторович,**

доктор технічних наук, доцент,

завідувач кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-0118-4748

**Пашинська Олена Генріхівна,**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-7102-1544

**Бойко Ігор Олександрович,**

кандидат технічних наук,

доцент кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-7742-4694

*Роботу присвячено дослідженню впливу структурних параметрів на міцність та пластичність високоміцного чавуну для подальшого удосконалення технологічного процесу. Як матеріал для досліджень використовували високоміцний чавун, який відповідає вимогам стандарту EN 1563:2018. Виплавку чавуну проводили в індукційній печі ємністю 5 тонн. Отримання високоміцного чавуну проводили шляхом оброблення металу в ковші. Також проводилось вторинне модифікування під час випуску металу з печі та третинне – в ливарній формі. Механічні випробування проводили на універсальній випробувальній машині згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1, твердість по Брінелю – згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1. Параметри графітної фази та мікроструктуру чавуну досліджували методом оптичної металографії згідно з вимогами стандарту ISO 945-1:2019. В ході роботи визначено особливості впливу характеристик графітної фази на механічні властивості високоміцного чавуну. Визначено особливості впливу структурного складу металевої матриці високоміцного чавуну на його механічні властивості. Узагальнюючи наведені дані, дійшли висновку, що комплекс механічних характеристик залежить від таких параметрів мікроструктури, як ступінь сфероїдизації графітних часток та їх дисперсність. Вплив ступеня сфероїдизації має пороговий характер, і її значення нижче 50% не дає можливості отримати значення відносного подовження вище 6–8%. Основним параметром є цільність графітних часток. В дослідженому діапазоні від 50 мм<sup>2</sup> до 200 мм<sup>2</sup> зменшення розміру часток приводить до одночасного зростання міцності та пластичності. Зростання міцності за збільшення частки перліту спостерігається тільки за умови отримання сприятливих параметрів графітної фази, причому зростання міцності приводить до деякого зниження пластичності матеріалу. Подальші дослідження необхідно спрямувати на дослідження методів керування дисперсністю графітної фази. Також для досягнення прогресу в підвищенні міцності чавуну слід продовжувати дослідження щодо керування структурним складом металевої матриці.*

**Ключові слова:** високоміцний чавун, модифікування, сфероїдизація, межа міцності, відносне подовження, ферит, перліт.

***Pashynskiy Volodymyr, Pashynska Olena, Boyko Ihor. Study of structural factors which determine the level of strength and plasticity of ductile cast iron***

The work is devoted to the study of the influence of structural parameters on the strength and plasticity of ductile cast iron for further improvement of the technological process. As a material for research, ductile cast iron was used, which meets the requirements of the EN 1563:2018 standard. Cast iron was melted in an induction furnace with a capacity of 5 tons. Obtaining of ductile cast iron was carried out by processing metal in a ladle. Secondary modification was also carried out during the pouring of metal from the furnace, and tertiary modification – in the mould. Tensile tests were performed on a universal testing machine in accordance with DSTU EN ISO 6892-1 standard, Brinell hardness - in accordance with the DSTU EN ISO 6892-1 standard. The parameters of the graphite phase and the microstructure of cast iron were investigated by the method of optical metallography in accordance with the ISO 945-1:2019 standard. The peculiarities of the influence of the characteristics of the graphite phase on

the mechanical properties of ductile cast iron were determined. The peculiarities of the influence of the structural composition of the metal matrix of ductile cast iron on its mechanical properties are determined. The complex of mechanical characteristics mostly depends on such microstructure parameters as the degree of spheroidization of graphite particles and their dispersion. The influence of the degree of spheroidization is of a threshold nature and its value below 50% does not allow obtaining a value of relative elongation higher than 6–8%. The main parameter is the integrity of the graphite particles. In the studied range from 50 mm<sup>2</sup> to 200 mm<sup>2</sup>, particle refinement leads to a simultaneous increase in strength and plasticity. An increase in strength with an increase in the proportion of pearlite is observed only if favorable parameters of the graphite phase are obtained, while an increase in strength leads to a certain decrease in the plasticity of the material. Further research should be directed to the study of methods of controlling the dispersion of the graphite phase. Also, to achieve progress in increasing the strength of cast iron, it is necessary to continue research in the direction of controlling the structural composition of the metal matrix.

**Key words:** ductile cast iron, modification, spheroidization, ultimate tensile strength, relative elongation, ferrite, pearlite.

Високоміцний чавун широко використовується для виготовлення різних деталей машинобудування за технологією лиття завдяки унікальному поєднанню відмінних ливарних властивостей, високих механічних властивостей і відносно невисокої ціни [1]. У міжнародній практиці існують стандарти та технічні умови, що визначають хімічний склад і механічні властивості цього матеріалу [2; 3]. Проте головною особливістю високоміцного чавуну є відсутність прямого зв'язку між складом і властивостями. Крім цих параметрів, кінцеві механічні властивості залежать від технології модифікації та сфероїдизації, технології процесу лиття (тривалість заливки форми, тип форми) та конструкції литої деталі. Для отримання необхідної марки матеріалу в конкретному виробі для певних умов необхідний тривалий і дорогий етап експериментального визначення технологічних параметрів. Тому дослідження, спрямовані на виявлення закономірностей формування структури та властивостей високоміцного чавуну, не тільки становлять науковий інтерес, але й мають велике практичне значення.

Одним з напрямів таких досліджень є прогнозування структуроутворення на основі аналізу подвійних та потрійних діаграм стану компонентів, які впливають на процеси сфероїдизації графіту та кінетику перетворення аустеніту [4]. Однак обмеженням такого підходу є неможливість отримати кількісні характеристики процесів. Тому частіше застосовують напівемпіричний підхід, коли будують моделі зв'язку кількісних параметрів структури з механічними властивостями. Так, автори [5] досліджували вплив кількості графітових часток на механічні властивості та теплопровідність феритного ковкого чавуну. Результати показали, що міцність феритного високоміцного чавуну не сильно змінилася зі збільшенням питомої кількості графітових часток, тоді як пластичність значно зросла. Це пояснюється тим, що концентрація напруги була ефективно знята зі збільшенням

кількості графітових часток під час випробування на розтяг.

Розвитком такого підходу стала робота [6], автори якої спрямували зусилля на отримання матеріалу з максимально можливим питомим значенням кількості графітних часток на одиницю об'єму матеріалу шляхом додаткового модифікування в ливарній формі. Результати показали, що кількість часток збільшується з інокуляцією Fe-Si у форму, і для тієї ж кількості модифікованого Fe-Si, кількість часток вища за застосування модифікатора на базі Fe-Si з мінімальним розміром часток реагенту. Однак процес модифікації у ливарній формі також вимагає експериментального відпрацювання для кожної деталі, тому автори роботи [7] вважають більш технологічним введення додаткового модифікування у розливному ковші. Порівняльні дослідження були проведені задля визначення ефективної кількості додаткового модифікатора (Al, Zr – FeSi) у кількості 0,05, 0,10 та 0,15 мас.% перед введенням сфероїдизуючого реагенту (10% Mg-FeSi). Оптимальним значенням вмісту додаткового модифікатора автори вважають значення 0,15 мас.%.

Проте в роботі [8] автори слушно зауважують, що на механічні властивості реальних відливок впливає також наявність у структурі чавуну об'ємних дефектів (пор, газових пузирів, включень і площинних дефектів з оксидних і вуглецевих плівок). Матеріал матриці також відіграє важливу роль, оскільки пластичний ферит забезпечує вищу пластичність, але нижчу межу текучості, ніж перліт. На ще один важливий параметр, який впливає на формування структури, вказують автори багатьох робіт [9]. Це швидкість охолодження, на яку впливають конструкція конкретного виробу, властивості ливарної форми, температурні параметри процесу лиття. Причому збільшення швидкості охолодження сприяє подрібненню розміру часток графіту і підвищенню пластичності, але одночасно підвищує ризик формування карбідів і, відповідно, окрихчення матеріалу.

З наведеного аналізу випливає, що можливості теоретичного прогнозування формування механічних властивостей відливок з високоміцного чавуну з достатньою для практичного застосування точністю обмежені. Проте навіть на рівні емпіричного підходу відсутні надійні кількісні дані щодо впливу параметрів графітних часток (характеристики форми часток, ступінь сфероїдизації графітної фази, розмір часток, кількість часток на одиницю площі) та параметрів металевої матриці (співвідношення ферит/перліт та морфологія перлітних колоній) на комплекс механічних властивостей матеріалу.

Метою роботи є встановлення структурних параметрів, які мають найбільший вплив на міцність та пластичність високоміцного чавуну як критеріїв подальшого удосконалення технологічного процесу. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначення особливостей впливу характеристик графітної фази відповідно до стандарту ISO 945-1:2019 на механічні властивості високоміцного чавуну;
- визначення особливостей впливу структурного складу металевої матриці високоміцного чавуну на його механічні властивості;
- визначення цільових значень параметрів структури, які забезпечують отримання заданих механічних характеристик.

Як матеріал для досліджень використовували високоміцний чавун, який відповідає вимогам стандарту EN 1563:2018. Хімічний склад чавуну відповідав вимогам стандарту EN-GJS 500-7. Конкретний склад досліджених зразків наведено в подальшому під час обговорення результатів. Виплавку чавуну проводили в індукційній печі ємністю 5 тонн на шихті з низьковуглецевих сталевих відходів, сталевому брухті категорії 3А, оборотних відходів чавунного лиття з додаванням навуглецюючого реагенту та 65% феросиліцію. Отримання високоміцного чавуну проводили шляхом оброблення металу в ковші ємністю 500 кг з використанням подачі сфероїдизуючого реагенту «6Mg – FeSi» та модифікатора системи Fe-Si-Ba. Порівнювали дві варіанти: «сендвіч»-технологію (варіант 1) та розміщення реагентів на дні ковшу без їх попереднього прикриття (варіант 2). Останній варіант використовували з дослідницькими цілями для отримання низьких ступенів сфероїдизації.

В частині плавок в комбінації з варіантом 2 додатково використовували вторинне модифікування Fe-Si-Ba подачею на струю під час випуску металу в ківш та третинне – під час заповнення ливарної форми.

Зразки для визначення механічних властивостей виготовляли шляхом вирізання з виробів згідно з п. 8.3 EN 1563:2018 та відливали окремо згідно з п. 8.2.3 EN 1563:2018.

Механічні випробування проводили на універсальній випробувальній машині з максимальним зусиллям 50 кН згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1, твердість по Бринелю – згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1. Параметри графітної фази та мікроструктуру чавуну досліджували на зразках, вирізаних з головок зразків для механічних випробувань з використанням методів оптичної металографії згідно з вимогами стандарту ISO 945-1:2019 в нетравленому стані та після травлення в 4% розчині HNO<sub>3</sub> в етанолі за збільшення ×100.

Результати досліджень показали, що процес отримання високоміцного чавуну є доволі варіабельним і, залежно від комбінації конкретних параметрів виробництва, структура та властивості змінюються у великому інтервалі значень. Для спрощення процесу аналізу підтримували стабільними такі технологічні параметри лиття, як тривалість і температура заливання форми.

У табл. 2 наведено приклади фото мікроструктур у травленому та нетравленому станах. Значення механічних властивостей та кількісні значення параметрів мікроструктури під час випробування на розтягнення зазначені біля фото.

Хімічний склад усіх зразків приблизно однаковий, за винятком вмісту магнію, який коливається в межах 0,025–0,045%, усереднені значення наведені в табл. 1. Причина значної різниці по магнію пов'язана з різними технологіями обробки розплаву в ковші.

Ступінь сфероїдизації зростає з підвищенням вмісту магнію. Аналіз близько 50 плавок свідчить про те, що за такого середнього хімічного складу металу мінімальний вміст магнію має бути не нижче 0,035%, що забезпечує ступінь сфероїдизації не менше 70%.

З табл. 2 видно, що значення відносного подовження мають прямий пропорційний зв'язок зі ступенем сфероїдизації. Аналіз

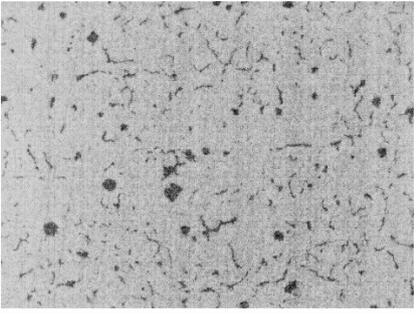
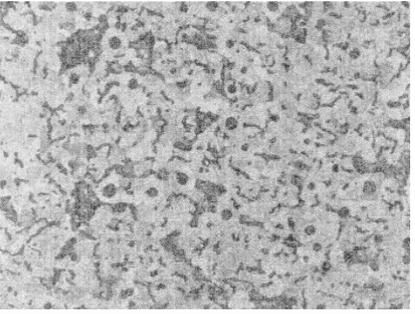
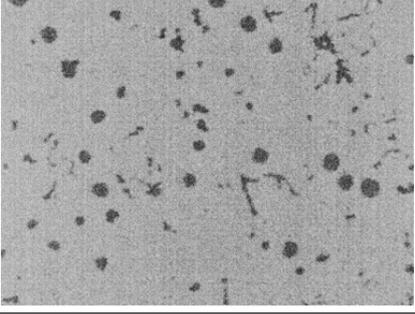
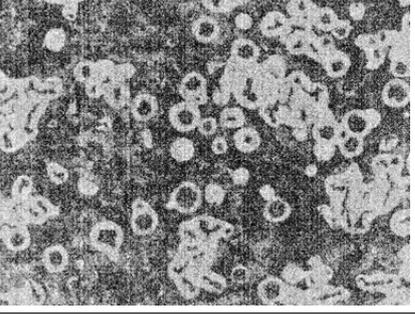
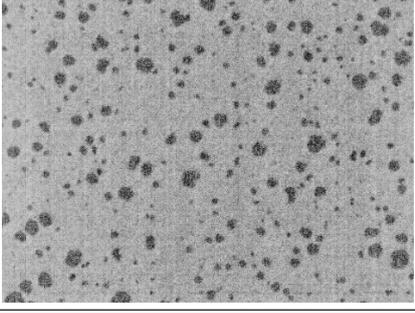
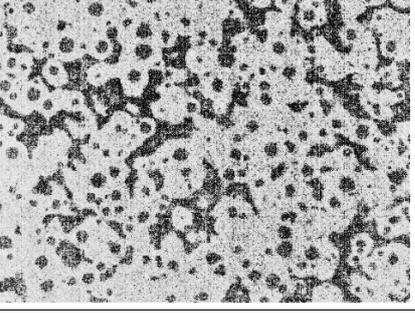
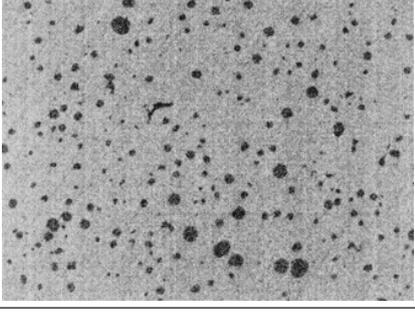
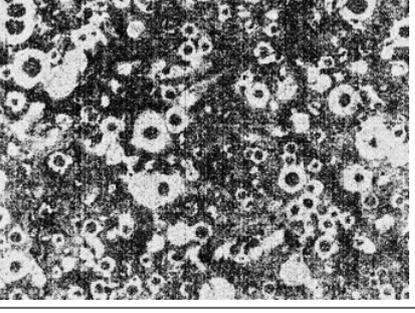
Таблиця 1

Усереднений хімічний склад зразків, % мас.

| C    | Si   | Mn  | Mg          | P     | S     |
|------|------|-----|-------------|-------|-------|
| 3,63 | 2,48 | 0,3 | 0,025–0,045 | 0,001 | 0,011 |

Таблиця 2

**Приклади мікроструктури високоміцного чавуну з різним рівнем механічних властивостей**

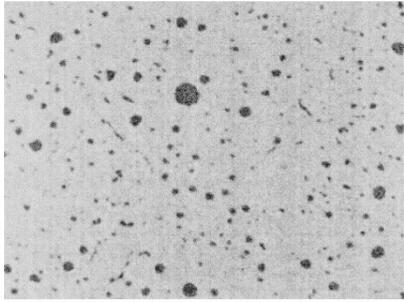
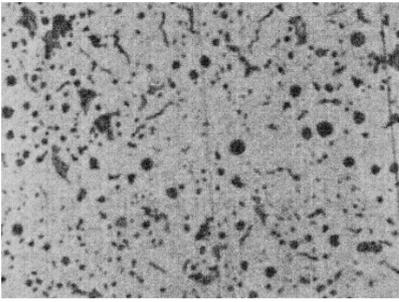
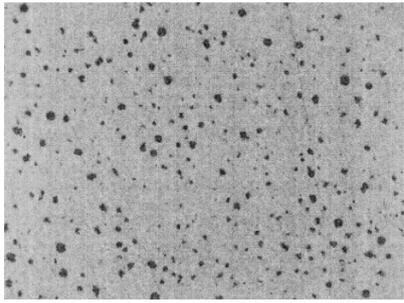
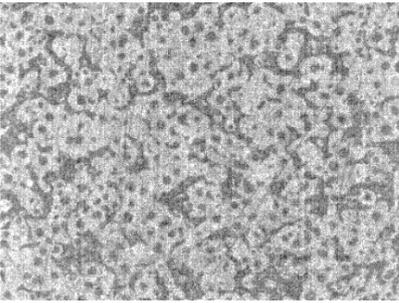
| Механічні характеристики   | Ступінь сфероїдизації   | Ферит та перліт у матриці   |
|--|---|---|
| Зразок 1<br>Межа міцності – 352 МПа<br>Відносне подовження – 6,7%<br>Ступінь сфероїдизації <   |    |    |
| Зразок 2<br>520–13,7<br>Межа міцності – 520 МПа<br>Відносне подовження – 8,5%<br>Ступінь сфероїдизації – 50%<br>Співвідношення ферит/перліт: 20/80%<br>Щільність часток – 100 мм <sup>-2</sup> |    |    |
| Зразок 3<br>Межа міцності – 504 МПа<br>Відносне подовження – 13,7%<br>Ступінь сфероїдизації – 80%<br>Співвідношення ферит/перліт: 80/20%<br>Щільність часток – 150 мм <sup>-2</sup>            |   |   |
| Зразок 4<br>Межа міцності – 668 МПа<br>Відносне подовження – 12,3%<br>Ступінь сфероїдизації – 80%<br>Співвідношення ферит/перліт: 20/80%<br>Щільність часток – 200 мм <sup>-2</sup>            |  |  |

великої кількості знімків дав змогу визначити, що мінімальний ступінь сфероїдизації для чавуну цього складу має бути не менше 50% для забезпечення виконання вимог стандарту для марки EN-GJS 500-7 до відносного подовження не менше 7%. Причому в дослідженому інтервалі складів та структурних характеристик зв'язок відносного подовження із співвідношенням ферит/перліт у матриці чавуну проявляється дуже слабо. Навіть за великих значень частки перліту в структурі за ступеня сфероїдизації не нижче 80% значення відносного подовження (10–16%) суттєво перевищують вимоги

стандарту (зразки 3 та 4). Другою характеристикою, яка впливає на пластичні характеристики, є питома кількість часток на одиницю площі. Стандарт ISO 945-1:2019 передбачає як розмірні характеристики графітних часток їх розмір та кількість на одиницю площі. Розрахунок цих параметрів проводиться тільки для часток IV–VI типів форми, він не враховує наявності виділень іншого типу. Але для структур з високим ступенем сфероїдизації отримані дані збігаються з літературними [7; 8] щодо позитивного впливу диспергування графітних часток на значення відносного подовження (табл. 3).

Таблиця 3

**Мікроструктура та властивості зразків з близьким ступенем сфероїдизації, але різним розміром графітних часток**

| Механічні характеристики  | Ступінь сфероїдизації  | Ферит та перліт у матриці   |
|---|--|---|
| <p>Зразок 5</p> <p>Межа міцності – 435 МПа<br/>Відносне подовження – 12,3%<br/>Ступінь сфероїдизації – 80%<br/>Співвідношення ферит/перліт: 95/5%<br/>Щільність часток – 80 мм<sup>-2</sup></p>   |  |  |
| <p>Зразок 6</p> <p>Межа міцності – 517 МПа<br/>Відносне подовження – 16,3%<br/>Ступінь сфероїдизації – 80%<br/>Співвідношення ферит/перліт: 80/20%<br/>Щільність часток – 200 мм<sup>-2</sup></p> |  |  |

З наведених даних видно, що з подрібненням графітної фази відносне подовження зростає з 12,3% до 16,3% навіть за більшого вмісту перліту в структурі.

Залежність характеристик міцності від співвідношення ферит/перліт має набагато складніший характер. Очевидно, що межа міцності зростає за збільшення частки перліту в структурі, але також значення міцності збільшуються за підвищення ступеня сфероїдизації та зменшення розміру сфероїдизованих часток (табл. 4).

З табл. 4 видно, що максимальні значення міцності досягаються тільки за одночасного досягнення високого ступеня сфероїдизації (не нижче 80%), високої щільності часток, а також частки перліту в структурі матриці не нижче 80%.

Узагальнюючи наведені дані, доходимо таких висновків:

1. Комплекс механічних характеристик залежить від таких параметрів мікроструктури, як ступінь сфероїдизації графітних часток та їх дисперсність, але характер залежності різний. Вплив ступеня сфероїдизації має пороговий характер, і її значення нижче 50% не дає змоги отримати значення відносного подовження вище 6–8%, тоді як зменшення розміру і підвищення щільності позитивно впливає на характеристики як міцності, так і пластичності.

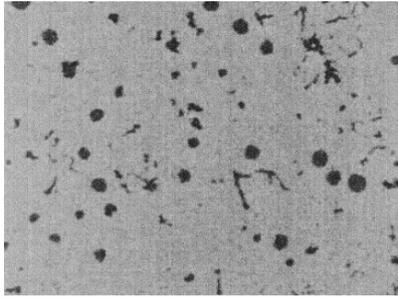
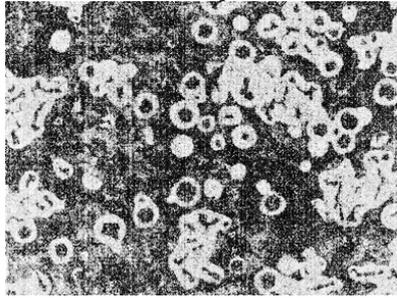
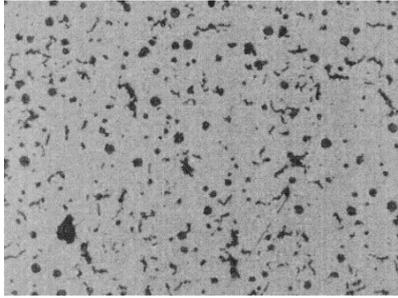
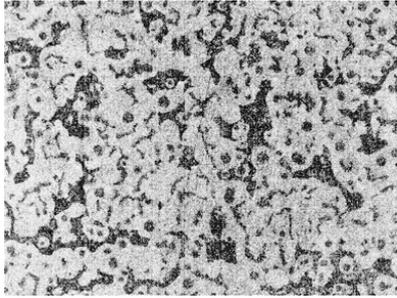
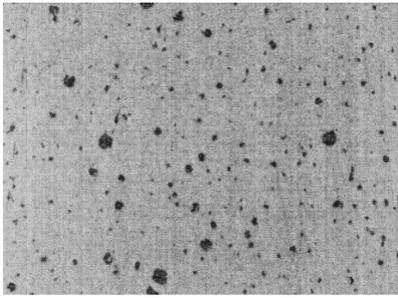
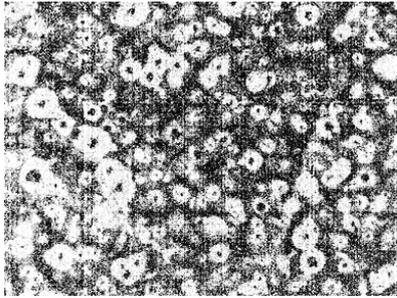
В дослідженому діапазоні щільностей часток від 50 мм<sup>-2</sup> до 200 мм<sup>-2</sup> подрібнення часток приводить до одночасного зростання міцності та пластичності.

2. Вплив співвідношення фериту та перліту в матриці в дослідженому інтервалі коливань хімічного складу має підпорядковане значення. Зростання міцності за збільшення долі перліту спостерігається тільки за умови отримання сприятливих параметрів графітної фази, причому зростання міцності приводить до деякого зниження пластичності матеріалу.

3. Подальші дослідження необхідно спрямувати на дослідження методів керування дисперсністю графітної фази, бо цей параметр найбільш сильно впливає як на міцність, так і на пластичність високоміцного чавуну, і подрібнення часток дає змогу одночасно підвищувати значення обох параметрів. Також для досягнення прогресу в підвищенні міцності чавуну необхідно продовжувати дослідження задля керування структурним складом металевої матриці, тому що у високоміцних чавунах по EN 1563:2018 структурний склад матриці більшою мірою обумовлений умовами охолодження відливки і меншою мірою – хімічним складом. Згідно зі стандартом, діапазони коливань складу феритних та перлітних чавунів перебиваються. Це потребує пошуку інших засобів впливу на формування структури.

Таблиця 4

**Мікроструктура та властивості зразків з різним співвідношенням ферит/перліт**

| Механічні характеристики  | Ступінь сфероїдизації  | Ферит та перліт у матриці  |
|---|--|--|
| <p>Зразок 7</p> <p>Межа міцності – 520 МПа<br/>Відносне подовження – 8,5%<br/>Ступінь сфероїдизації – 80%<br/>Співвідношення ферит/перліт: 20/80%<br/>Щільність часток – 70 мм<sup>-2</sup></p>   |   |   |
| <p>Зразок 8</p> <p>Межа міцності – 622 МПа<br/>Відносне подовження – 9,9%<br/>Ступінь сфероїдизації – 80%<br/>Співвідношення ферит/перліт: 80/20%<br/>Щільність часток – 150 мм<sup>-2</sup></p>  |   |   |
| <p>Зразок 9</p> <p>Межа міцності – 658 МПа<br/>Відносне подовження – 12,3%<br/>Ступінь сфероїдизації – 80%<br/>Співвідношення ферит/перліт: 20/80%<br/>Щільність часток – 200 мм<sup>-2</sup></p> |  |  |

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Saravanan V.S. An Introduction to Ductile Iron Metallurgy and Melting Practice: Ductile Iron Technology. LAP LAMBERT Academic Publishing (October 18, 2012), 76 p.
2. ASTM A536 Standard Specification for Ductile Iron Castings. URL: <https://www.astm.org/a0536-84r19e01.html>.
3. ДСТУ EN 1563:2015 Литво. Чавун з кулястим графітом. Технічні умови (EN 1563:2011, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=63675](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63675).
4. Кропивний В.М., Босий М.В., Кузик, О.В. Кропивна А.В. До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні діаграм стану систем «Fe-Si», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg». *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2023. Col. 7 (38). P. II. P. 34–42. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.34-42](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42).
5. Liu Ch., Du Y., Ying T., Zhang L., Zhang X., Wang X., Yan G., Jiang B. Effects of graphite nodule count on mechanical properties and thermal conductivity of ductile iron. *Materials Today Communications*. 2022. Vol. 31. June. 103522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103522>.
6. Singh S., Yadav S., Kumar A. Improvement of Nodularity Value of Graphite in Ductile Iron and Its Effect on Mechanical Properties *Macromolecular Symposia*. 2023. Vol. 407. Issue 1. February. First published: 23 February 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.202200118>.
7. Mojisola T., Seidu S.O., Olubam P.A., Adediran A.A. Effect of preconditioning on the microstructure and mechanical properties of ductile cast iron. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. Supplement 1. P. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.081>.
8. Nilsson K.-F., Vokál V. Analysis of ductile cast iron tensile tests to relate ductility variation to casting defects and material microstructure *Materials Science and Engineering*. 2009. Vol. 502. Issues 1–2. 25 February. P. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.082>.
9. Doru M., Stefanescu L.P., Dix R., Ruxanda C., Corbitt-Coburn T.S. Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron. *Transactions American Foundry Soc*. 2002. Vol. 1102002. P. 1149–1161.

**REFERENCES:**

1. Saravanan V.S. (2012). An Introduction to Ductile Iron Metallurgy and Melting Practice: Ductile Iron Technology. LAP LAMBERT Academic Publishing (October 18, 2012), 76 p.
2. ASTM A536 Standard Specification for Ductile Iron Castings. 2019. Retrieved from: <https://www.astm.org/a0536-84r19e01.html>.
3. DSTU EN 1563:2015 Lytvo, Chavun z kulyastym graphytom. Tekhnichny umovy [Casting. Ductile iron. Technical Specification] (EN 1563:2011, IDT). Electronic recourse. Retrieved from: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=63675](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63675). [in Ukrainian]
4. Kropivnyi V.M., Bosyi M.V., Kuzyk O.V., Kropivna A.V. (2023). Do pytannya strukturoutvorennya vysokomytsnogo chavunu pry vykorystanny diagram stanu system "Fe-Si", "Mg-Si" ta "Fe-Si-Mg" [Concerning the problem of structure formation of the ductile iron with using of equilibrium diagrams of "Fe-Si", "Mg-Si" ta "Fe-Si-Mg" systems]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. Col. 7 (38). P. II. P. 34–42. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.34-42](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42). [in Ukrainian]
5. Chen Liu, Yuzhou Du, Tao Ying, Liandong Zhang, Xinyu Zhang, Xin Wang, Guojun Yan, Bailing Jiang. (2022) Effects of graphite nodule count on mechanical properties and thermal conductivity of ductile iron. *Materials Today Communications*, Volume 31, June, 103522. <https://doi.org/10.1016/j.matcomm.2022.103522>.
6. Sudesh Singh, Susheel Yadav, Amitesh Kumar. (2023) Improvement of Nodularity Value of Graphite in Ductile Iron and Its Effect on Mechanical Properties *Macromolecular Symposia* Volume 407, Issue 1. February 2023. 2200118 First published: 23 February. <https://doi.org/10.1002/masy.202200118>.
7. Mojisola T., Seidu S.O., Olubam P.A., Adediran A.A. (2022). Effect of preconditioning on the microstructure and mechanical properties of ductile cast iron. *Materials Today: Proceedings*. Volume 62. Supplement 1. P. 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.081>
8. Karl-Fredrik Nilsson, Vratko Vokál (2009). Analysis of ductile cast iron tensile tests to relate ductility variation to casting defects and material microstructure *Materials Science and Engineering: A* Volume 502. Issues 1–2. 25 February. P. 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.082>.
9. Doru M., Stefanescu L.P., Dix R., Ruxanda C., Corbitt-Coburn T.S. (2002). Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron. *Transactions American Foundry Soc.* Vol. 1102002. P. 1149–1161.

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 531.3:621.86:69.002.5

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-3>

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОБОТУ ГІРНИЧИХ МАШИН

**Налобіна Олена Олександрівна,**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0003-1661-7331

**Голотюк Микола Віталійович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0003-3661-4437

**Бундза Олег Зіновійович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0003-3770-0273

*Динамічні навантаження, що виникають під час роботи гірничих машин, є важливим аспектом безпеки та ефективності видобутку корисних копалин. Вони можуть бути спричинені різними факторами, такими як нерівності поверхні, зміни швидкості та напрямку руху, розриви матеріалів під час вибухових робіт. Вони здатні призводити до прискореного зносу деталей машин, підвищення витрат палива, збільшення технічних зупинок та аварійних ситуацій, що загрожують безпеці працівників та знижують продуктивність видобутку.*

*Метою дослідження є вивчення динамічних навантажень на гірничі машини та встановлення оптимальних способів зменшення цих навантажень. Дослідження проводилося за допомогою математичного моделювання процесів. Основні параметри, які впливають на динамічні навантаження, включають швидкість руху машини, габаритні розміри її колісної бази, ступінь наповнення ковша.*

*Отримані результати дослідження дали змогу визначити оптимальні способи зменшення динамічних навантажень на гірничі машини. Наприклад, встановлено, що використання адаптивних систем управління ходовою частиною дає змогу зменшити вплив нерівностей поверхні на машину та знизити ризик її перекидання.*

*Отримані результати можуть бути використані для підвищення безпеки та ефективності роботи гірничих машин, що сприятиме підвищенню продуктивності гірничого виробництва та зниженню його впливу на довкілля.*

*Запропоновано навантаження пружної системи робочого органу під час зміни зовнішнього опору у функції швидкості, що дає змогу зменшити динамічні навантаження і знизити енергозатрати робочого процесу.*

**Ключові слова:** динаміка, пружна система, машина, робочий орган, ходова система, система керування.

**Nalobina Olena, Holotyiuk Mykola, Bundza Oleg. Study of the influence of dynamic loads on the operation of mining machines.**

*The dynamic loads that occur during the operation of mining machines are an important aspect of the safety and efficiency of mining. These loads can be caused by various factors, such as surface irregularities, changes in speed and direction of movement, ruptures of materials during blasting, and others. They can lead to accelerated wear of machine parts, increased fuel consumption, increased technical stops and emergency situations, which threaten the safety of workers and reduce mining productivity.*

*The purpose of this study was to study the dynamic loads on mining machines and establish optimal ways to reduce these loads. The research was carried out with the help of mathematical modeling of processes. The main*

parameters that affect dynamic loads include the speed of the machine, the overall dimensions of its wheel base, the degree of filling of the bucket and others.

The obtained results of the research made it possible to determine the optimal methods of reducing dynamic loads on mining machines. For example, it has been established that the use of adaptive undercarriage control systems allows reducing the impact of surface irregularities on the machine and reducing the risk of its overturning.

The obtained results can be used to increase the safety and efficiency of mining machines, which in turn will contribute to increasing the productivity of mining production and reducing its impact on the environment.

The load of the elastic system of the working body when the external resistance changes as a function of speed is proposed, which allows to reduce dynamic loads and reduce the energy consumption of the work process.

**Key words:** dynamics, elastic system, machine, working body, running system, control system.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Динамічна система – це механічна система, яка може здійснювати коливальний рух. До таких систем належать важільні, кулачкові, зубчасті, фрикційні механізми, механізми з гнучкими ланками, пневматичні та гідравлічні механізми, а також системи з електричними та електронними зв'язками.

Механічні системи з електричними зв'язками – це машинні агрегати, де виникають перехідні процеси, зумовлені системою керування електродвигуном або генератором.

Механічні системи з електронними зв'язками – це машинні агрегати, керовані електронними пристроями, що взаємодіють з механічною частиною агрегатів і впливають на їх роботу.

Динамічні системи можуть бути різної складності, їх характеризують числом ступенів свободи, що дає змогу визначати їх стан у будь-який момент часу. У динамічних системах всі або окремі компоненти розглядаються як пружні, тобто вони можуть деформуватися, але деформація не перевищує меж пружності. Ця властивість пружності дає змогу динамічній системі повертатися в положення стійкої рівноваги, супроводжуючись коливальними рухами.

Динамічні системи також мають властивість демпфування коливань, яка заважає розвитку коливальних процесів. Ця властивість виникає через внутрішнє тертя в кінематичних парах систем та в матеріалах конструкції їх компонентів. Під час демпфування частина механічної енергії перетворюється на теплову.

Якщо в динамічній системі можна ігнорувати демпфувальні зв'язки і враховувати лише пружні, то таку систему називають консервативною. У такій ідеалізованій системі механічна енергія залишається постійною під час коливань.

Динамічні системи, де механічна енергія зменшується і відбуваються затухаючі коливання за відсутності зовнішнього впливу, називаються дисипативними. Такі системи включають комплекс пружних і демпфувальних зв'язків.

Залежно від типу пружних деформацій компонентів динамічних систем, коливання можуть бути поздовжніми, поперечними або крутними [1; 2].

Дослідження, що висвітлюють проблему статті, вказують на те, що найбільші навантаження на робочих органах і в приводах гірничих машин виникають у процесі стопоріння робочих органів. Автори дійшли висновку, що амплітудні значення динамічних навантажень у пружних елементах визначаються конструктивними параметрами трансмісії, жорсткістю перепони та режимом роботи машини.

Для практичних розрахунків динамічних навантажень у процесі руху робочих органів використовуються одно- та двомасові динамічні моделі з достатньою точністю. Проте залишається відкритим питання перерозподілу цього навантаження за елементами механічної системи машини, які мають різні пружно-інерційні властивості. Також залишаються невідомими коефіцієнти динамічності окремих елементів машини в такому екстремальному режимі роботи [3; 4; 5].

**За необмеженого зчеплення рушіїв з ґрунтом** можна виділити дві технологічні стадії функціонування: початковий сталий рух машини до заглиблення робочого органу та робочий несталий рух в процесі копання. Відповідна розрахункова схема представлена на рис. 1.

На першій стадії (рис. 1, а) машина з наведеною масою  $m_n$  рухається зі сталою швидкістю  $V_{поч}$ , долаючи до початку копання опір руху  $P_o$ . При цьому рушійна сила  $P_o$  дорівнює силі  $P_o$ .

На другій стадії (рис. 1, б) сила опору копанню  $P_c$  представляється як опір за лінійної деформації ґрунту і графічно інтерпретується у вигляді пружини з жорсткістю, рівній інтенсивності зростання опору  $A$ . В цьому випадку приймаємо:

$$P_c = P_o + A \cdot S, \quad (1)$$

де  $S$  – координата переміщення.

Буксування рушіїв відсутнє і рушійна сила менше сили зчеплення ( $P_d < T_\phi$ ). Вважаємо, що рушійна сила є функцією швидкості:  $P_d = f(\dot{S})$ .

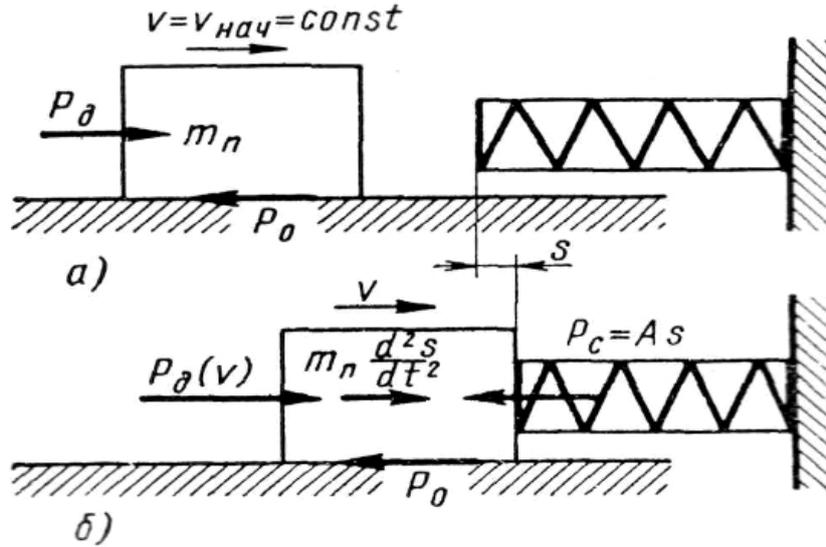


Рис. 1. Розрахункова схема одномасової динамічної системи ЗТМ:

а – до початку копання, б – в процесі копання ґрунту

Рівняння руху машинного агрегату має такий вигляд:

$$P_d(\dot{S}) - P_0 - A \cdot S - m_{\Pi} \cdot \ddot{S} = 0. \quad (2)$$

Після перетворення маємо:

$$\ddot{S} + G \cdot \dot{S} + \frac{A}{m_{\Pi}} \cdot S = D. \quad (3)$$

Постійні коефіцієнти  $G$  і  $D$  залежать від початкового опору  $P_0$  і характеру зміни рушійної сили  $P_d$ . Їх значення визначаються за формулами, наведеними в монографії А.М. Холодова.

Рішення характеристичного рівняння, відповідного рівнянню (3), має такий вигляд:

$$\alpha_{1,2} = -\frac{G}{2} \pm \sqrt{\frac{G^2}{4} - \frac{A}{m_{\Pi}}}. \quad (4)$$

Якщо  $G^2 > \frac{4A}{m_{\Pi}}$ , то:

$$S_1 = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t} + \frac{D \cdot m_{\Pi}}{A}. \quad (5)$$

Якщо  $G^2 < \frac{4A}{m_{\Pi}}$ , то:

$$S_2 = e^{-Gt/2} (C_3 \cdot \cos pt + C_4 \cdot \sin pt) + \frac{D \cdot m_{\Pi}}{A}, \quad (6)$$

де  $p = \sqrt{\frac{A}{m_{\Pi}} - \frac{G^2}{4}}$  – частота затухаючих коливань.

У практичних розрахунках доводиться мати справу з обома отриманими рішеннями.

Прийmemo такі початкові умови: при  $t = 0$   $S = 0$ ;  $\dot{S} = V_H$ .

Відзначимо, що початкову швидкість за переходу від рівномірного руху до копання зі зростаючим опором можна представити у такому вигляді:

$$V_H = D/G. \quad (7)$$

Після знаходження довільних постійних  $M$  і ряду перетворень отримаємо:

$$S_1 = \frac{D}{G \cdot r} \left( -\frac{\alpha_2}{\alpha_1} e^{\alpha_1 t} + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} e^{\alpha_2 t} \right) + \frac{D \cdot m_{\Pi}}{A}, \quad (8)$$

$$V_1 = \dot{S}_1 = \frac{D}{G \cdot r} (-\alpha_2 e^{\alpha_1 t} + \alpha_1 e^{\alpha_2 t}), \quad (9)$$

$$a_1 = \ddot{S}_1 = -\frac{DA}{m_{\Pi} \cdot G \cdot r} (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}), \quad (10)$$

$$\text{де } r = 2 \sqrt{\frac{G^2}{4} - \frac{A}{m_{\Pi}}};$$

$$S_2 = \frac{D m_{\Pi}}{A} e^{-Gt/2} \left[ \left( \frac{A}{G \cdot m_{\Pi} \cdot p} - \frac{G}{2p} \right) \sin pt - \cos pt + 1 \right], \quad (11)$$

$$V_2 = \dot{S}_2 = D \cdot e^{-Gt/2} \left( \frac{1}{G} \cos pt + \frac{1}{2p} \sin pt \right), \quad (12)$$

$$a_2 = \ddot{S}_2 = -e^{-Gt/2} \frac{AD}{G \cdot m_{\Pi} \cdot p} \sin pt. \quad (13)$$

Завдання динамічного розрахунку ЗТМ зазвичай зводиться до пошуку максимальних прискорень у процесі копання ( $a_{1max}$  або  $a_{2max}$ ). При цьому динамічне навантаження на робочий орган складає:

$$F_{max} = m_{\Pi} \cdot a_{max}. \quad (14)$$

Отже, головними чинниками, що визначають динамічні навантаження в ЗТМ, є початкова швидкість копання, наведена маса машини та інтенсивність зростання опору.

Для експлуатаційного планування використовуються причіпні і напівнавісні довгобазові планувальники. «Слабкою ланкою» в таких машинах є пружна система відвалу. Саме в ній виникають найбільш небезпечні динамічні навантаження. Для дослідження зазначеної проблеми розглянемо розрахункову схему, представлену на рис. 2.

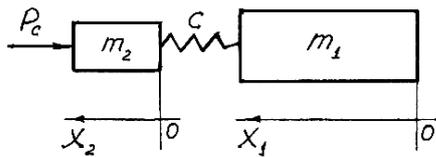


Рис. 2. Розрахункова схема динамічної системи відвалу планувальника

Прийmemo такі позначення:  $m_1$  – маса планувальника без робочого органа;  $m_2$  – наведена маса відвалу;  $c$  – жорсткість пружної системи відвалу;  $P_c$  – сила опору, що вирівнюється ґрунтом;  $x_1$  і  $x_2$  – координати переміщення планувальника і відвалу.

За невеликих швидкостей руху планувальника маємо:

$$P_c = \frac{P}{v} \cdot \dot{x}_2, \quad (15)$$

де  $P$  – найбільша сила опору за максимальної швидкості розгону машини  $v$ ;  $\dot{x}_2$  – швидкість руху відвалу.

Вважатимемо, що в момент розгону машини прискорення постійне. Тоді координати центра маси будуть знаходитися так:

$$x_1 = \frac{v \cdot t^2}{2t_1}, \quad (16)$$

де  $t_1$  – час розгону до номінальної швидкості після зупинки машини.

Рівняння руху маси  $m_2$  набуде такого вигляду:

$$m_2 \ddot{x}_2 - (x_1 - x_2)c = -\frac{P}{v} \cdot \dot{x}_2. \quad (17)$$

Підставляючи сюди вираз для  $x_1$ , після перетворення отримаємо:

$$\ddot{x}_2 + \frac{P}{v \cdot m_2} \dot{x}_2 + \frac{c}{m_2} \cdot x_2 = \frac{v \cdot c \cdot t^2}{2m_2 t_1}. \quad (18)$$

Приймаємо такі початкові умови:  $t = 0 \quad x_2 = 0; \quad \dot{x}_2 = 0$ .

Рівняння (18) за структурою аналогічно рівнянню (17). Опускаючи детальне рішення,

знайдемо вираз для шуканого динамічного навантаження в пружній системі відвалу:

$$Q_d = (x_1 - x_2)c = -\frac{e^{\alpha t}}{v \cdot c \cdot t_1 \cdot \beta} (\gamma \cdot \sin \beta t + \delta \cdot \cos \beta t) + \frac{P}{t_1} \left( t - \frac{P}{c \cdot v} \right) + \frac{v \cdot m_2}{t_1}, \quad (19)$$

$$\text{де } \alpha = -\frac{P}{2vm_2}; \quad \beta = \sqrt{\frac{c}{m_2} - \frac{P^2}{4v^2 m_2^2}};$$

$$\gamma = \frac{P(v^2 m_2 c + P^2)}{2 \cdot v \cdot m_2}; \quad \delta = \beta(v^2 m_2 c - P^2).$$

Час  $t$  обмежений часом розгону  $t_1$  і не може його перевищувати.

Графік функції  $Q_d = f(t)$  показаний на рис. 3.

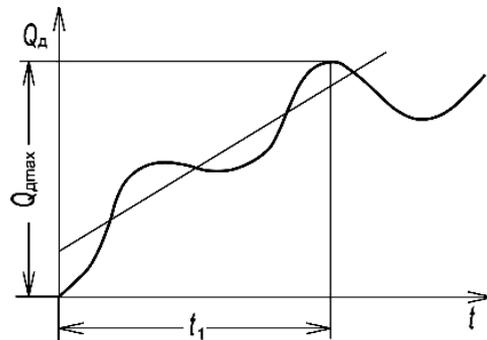


Рис. 3. Графік навантаження пружної системи відвалу за зміни зовнішнього опору у функції швидкості

Час  $t_m$  відповідає максимуму функції  $Q_d(t)$ , тобто:

$$t_m = t_1 = \frac{1}{\beta} \arctg \left( \frac{\gamma}{\delta} \right). \quad (20)$$

Тоді:

$$Q_{d\max} \cong \frac{e^{\alpha t_1} \sqrt{\gamma^2 + \delta^2}}{v c t_1 \cdot \beta} + P \left( 1 - \frac{P}{c v t_1} \right) + \frac{v m_2}{t_1}. \quad (21)$$

Якщо маса  $m_2$ , крім динамічного навантаження, сприймає статичну силу  $Q_c$ , то повне максимальне навантаження в пружній системі відвалу складатиме:

$$Q_{\text{полн. макс}} = Q_{d\max} + Q_c. \quad (22)$$

**Висновки.** Аналізуючи отримані результати маємо, що в гірничих машин динамічні навантаження в системі планувальника постійно змінюються, зростаючи з навантаженням на відвал. Виконані дослідження дають можливість підібрати раціональні параметри елементів пружної системи відвала планувальника для зменшення динамічних навантажень.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідійомних машин: монографія. Київ: Компрінт, 2012. 298 с.
2. Ніколаєнко В.А., Гончар М.О., Високович Є.В. Динамічна модель землерийної машини безперервної дії з ланцюгово-балковим робочим органом. *Вісник Національного транспортного університету*. 2019. № 3. С. 25–34.
3. Мусійко В.Д., Гончар М.О., Ніколаєнко В.А. Динамічні навантаження в мобільній землерийній машині безперервної дії під час стопоріння робочих органів. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2020. № 88. Т. 2. С. 61–66.
4. Сур'янінов М.Г., Дащенко О.Ф., Білоус П.О. Теоретичні основи динаміки машин. Одеса: Наука і техніка, 2004. 292 с.
5. Дмитриченко М.Ф., Вікович І.А. Динаміка мобільних машин з начіпними функціональними елементами: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2008. 496 с.

**REFERENCES:**

1. Loveikin V.S., Romasevych Yu.O. (2012). Analiz ta syntez rezhymiv rukhu mekhanizmv vantazhopidiomnykh mashyn: monohrafiia [Analysis and synthesis of modes of movement of mechanisms of lifting machines: monograph]. K.: Komprint. 298 p. [in Ukrainian]
2. Nikolaienko V.A., Honchar M.O., Vyskovych Ye.V. (2019). Dynamichna model zemleryinoi mashyny bezperervnoi dii z lantsiuhovo-balkovym robochym orhanom [A dynamic model of a continuous earthmoving machine with a chain-beam working body]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*. № 3. P. 25–34. [in Ukrainian]
3. Musiiko V.D., Honchar M.O., Nikolaienko V.A. (2020). Dynamichni navantazhennia v mobilnii zemleryinii mashyni bezperervnoi dii pid chas stoporinnia robochych orhaniv [Dynamic loads in a mobile earthmoving machine of continuous action during the stoppage of the working bodies]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*. № 88. T. 2. P. 61–66. [in Ukrainian]
4. Surianinov M.H., Dashchenko O.F., Bilous P.O. (2004). Teoretychni osnovy dynamiky mashyn [Theoretical foundations of machine dynamics]. Odesa: Nauka i tekhnika. 292 p. [in Ukrainian]
5. Dmytrychenko M.F., Vikovych I.A. (2008). Dynamika mobilnykh mashyn z nachipnymy funktsionalnymy elementamy: monohrafiia [Dynamics of mobile machines with attached functional elements: monograph]. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. 496 p. [in Ukrainian]

УДК 621.865:004.896

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-4>

## ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИЗАЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Цимбал Богдан Михайлович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки  
Національний університет цивільного захисту України;  
доцент кафедри автоматизації, електро- та роботехнічних систем  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0002-2317-3428

**Сичов Володимир Вікторович,**

здобувач вищої освіти  
факультету автоматизації виробництва та цифрових технологій  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0009-0005-3767-3473

*У статті представлено особливості роботизації металургійного виробництва України. Встановлено, що металургійна галузь України потребує заміни людської праці робочих професій, які працюють в екстремальних умовах, таких як підвищена температура, загазованість робочої зони, яскраве опромінювання, гарячі поверхні, протяги, які можуть призвести до нещасних випадків та професійним захворювань. Розглянуто переваги застосування промислових роботів та робототехнічних систем задля зменшення трудомісткості, заміни ручної праці, зменшення ризиків для безпеки працівників, збільшення потужностей виробництва. Встановлено, що застосування промислових роботів може виключити людський чинник під час виконання стандартизованих операцій, визначення якості продукції, температури, відбору проб та вибраковування готової продукції. Визначено, що використання робота-пробовідбірника дає змогу уникнути неточностей та помилок під час відбору проб на транспортних засобах. Запропоновано для виконання цих операцій використовувати 6-осьовий промисловий робот та 14-метрову напрямну для формування 7-осьового режиму руху, при цьому напрямна рейка промислового робота може бути вмонтована вздовж напрямку руху каретки. Встановлено, що наявний процес видалення шлаку виконується під час застосування ручного спостереження та контролю за виконанням технологічних операцій, а також тих, які пов'язані з експлуатацією обладнання та ґрунтуються на ручному визначенні, контролі шляху та глибини видалення шлаку, що може призвести до тривалого виробництва, серйозних втрат заліза, надмірного або недостатнього видалення шлаку та металу в ковші. Запропоновано металургійним підприємствам впровадити в експлуатацію робототехнічну систему для видалення залишків шлаку. Встановлено, що традиційний спосіб змащування агломераційного візка вимагає його зупинки та ручного змащування, а також ручного очищення та обслуговування після роботи, але наявні металевий пил та суха речовина, яка утворюється під час спікання пилу та мастила, при цьому підшипниковий вузол буде недостатньо змащений та буде відбуватися процес зношування осі колеса від абразиву та недостатнього змащування. Експлуатація промислового робота для автоматичного очищення маслозаливного отвору може запобігти прилипанню пилу до маслозаливного отвору та її потраплянню на вісь колеса та компоненти підшипника, що може зменшити швидкість зношування.*

**Ключові слова:** промислові роботи, роботизовані системи, металургійні виробництва, екстремальні умови праці, змащування агломераційного візка, відбір проб, контроль температури в сталеплавильній печі, видалення шлаку.

### **Tsybmal Bohdan, Sychov Volodymyr. Features of Robotisation of Metallurgical Production**

*The article presents the features of robotization of metallurgical production in Ukraine. It has been established that the metallurgical industry of Ukraine needs to replace human labour with workers who work in extreme conditions, such as high temperature, gas pollution in the working area, bright radiation, hot surfaces, drafts, which can lead to accidents and occupational diseases. The paper examines the benefits of using industrial robots and robotic systems to reduce labour intensity, replace manual labour, reduce risks to employee safety, and increase production capacity. It has been established that the use of industrial robots can eliminate the human factor when performing standardized operations, determining product quality, temperature, sampling and rejecting finished products. It was determined that the use of a robotic sampler allows avoiding inaccuracies and errors during sampling on vehicles. It was proposed to use a 6-axis industrial robot and a 14-metre guide rail to form a 7-axis mode of movement, with the industrial robot guide rail*

*mounted along the direction of the carriage. It was found that the existing slag removal process is carried out using manual observation and control over the performance of technological operations, operations that are associated with the operation of equipment and are based on manual determination and control of the path and depth of slag removal, which can lead to long production, serious iron losses, excessive or insufficient removal of slag and metal in the ladle. It was proposed that metallurgical enterprises should introduce a robotic system for removing slag residues. It was found that the traditional method of lubricating the sintering trolley requires it to be stopped and manually lubricated, as well as manual cleaning and maintenance after operation, but the metal dust and dry matter generated during the sintering of dust and lubricating oil, while the bearing assembly will be insufficiently lubricated and the wheel axle will be worn out, from abrasion and insufficient lubrication. The operation of an industrial robot to automatically clean the oil filling hole can prevent dust from sticking to the oil filling hole and entering the wheel axle and bearing components, which can reduce the wear rate.*

**Key words:** industrial robots, robotic systems, metallurgical production, extreme working conditions, sinter trolley lubrication, sampling, temperature control in a steelmaking furnace, slag removal.

Для великих металургійних підприємств характерний довготривалий процес виробництва чавуну та сталі, що переважно включає низку складних, низькотехнологічних, ресурсомістких етапів – коксування, спікання, гранулювання та виробництво чавуну в доменній печі [1]. На стадії виробництва сталі переважно є такі процеси, як конвертер, рафінувальна піч, безперервне лиття та прокатка [2].

Процес виробництва чавуну та сталі має безперервне, дискретне та напівбезперервне співіснування, яке є відносно складним, і більша частина виробничого процесу є напівструктурною та неструктурованою, при цьому оптимізувати обробку важко [3]. Вирішити цю проблему має поєднання технології штучного інтелекту та традиційних методів.

Традиційна металургійна промисловість є галуззю з високим споживанням енергії та високим рівнем забруднення, яка має характеристики високої температури, високого рівня пилу, високого рівня шуму та інших агресивних середовищ і високих ризиків, таких як рідкий розплавлений метал [4]. Вдосконалення галузі щодо технологічних інновацій відбувається поступово заміною ручних операцій промисловими роботами. Це матиме комплексний позитивний вплив, який дасть змогу зменшити ризики безпеки працівників, трудомісткість, собівартість продукції, підвищити ефективність праці та екологічність виробничого процесу [5].

Наразі більшість майбутніх проєктів роботів, які можуть успішно застосовуватись на металургійних підприємствах України, зосереджено у сталеплавильному та постсталеплавильному виробництві, що також пов'язано зі швидкими темпами та високим ступенем автоматизації самої виробничої лінії. Наприклад, вимірювання температури та відбір проб перед сталеплавильною піччю, автоматичне видалення ливарного шлаку, перевірка та відбір проб, розпилення номерів заготовок, розпилювальний

друк сталевих рулонів, об'єднання, роз'єднання, маркування [6].

Роботизація металургійного виробництва має великі перспективи та переваги, бо може замінити ручну працю. При цьому робоча зона характеризується підвищеною небезпекою зі шкідливими та небезпечними чинниками, такими як аномально високі температури, велика кількість пилу та малий простір на металургійних виробництвах, нагальні вимоги підприємств щодо збільшення виробничих потужностей, покращення процесів виробництва продукції та підвищення якості продукції, а також дедалі серйозніші труднощі з підбором персоналу на підприємствах. Це може спонукати металургійні підприємства України експлуатувати промислових роботів [7]. Вони можуть набути широкого застосування у виробництві сталі, чавуну, гарячій і холодній прокатці та інших промислових ланках на металургійних підприємствах.

**Метою дослідження** є підвищення продуктивності виробництва, енергоефективності, безпеки праці, підвищення якості готової продукції за рахунок роботизації металургійного виробництва. Для досягнення поставленої мети треба вирішити такі завдання:

- визначити роботи, які виконуються в екстремальних умовах та підлягають роботизації;
- розробити рекомендації, щодо застосування промислових роботів у металургійному виробництві;
- провести аналіз та визначити переваги експлуатації промислових роботів на металургійних заводах.

Об'єктом дослідження є промислові роботи для металургійного виробництва. Предметом дослідження є роботизація металургійного виробництва. Гіпотезою дослідження є те, що розроблені рекомендації щодо застосування промислових роботів та їх експлуатації підвищать ефективність та безпеку металургійного виробництва. Аналіз металургійного

виробництва, технологічних процесів, робочих операцій, умов праці та їх недоліків дає змогу виявити проблемні моменти в металургійному виробництві та запропонувати його вдосконалення й модернізацію. Дослідження проведено на основі комплексу необхідних методів, насамперед методу системного аналізу, структурно-функціонального методу та методу порівняння. Дослідження проводили на універсальному пристрої. Для автоматизованого проєктування та симуляції використано персональний комп'ютер. Для побудови схем промислових роботів металургійного виробництва використовувалась система автоматизованого проєктування Autodesk AutoCAD 2024.

У металургійній промисловості заміна ручних операцій промисловими роботами має значні переваги.

Роботи можуть замінити людей на трудомістких роботах металургійного виробництва. Під час виконання повторюваних та трудомістких операцій використання роботів може значно зменшити інтенсивність професійних захворювань та уникнути травм, спричинених повторюваною роботою. Наприклад, безпілотне водіння, видалення шлаку з ковша, підрахунок прутків, маркування готової продукції.

Роботи замінюють людей на роботах з високим професійним ризиком та важкими робочими умовами. Це операції у металургійній промисловості, які мають токсичні та шкідливі гази та високу температуру такі як вимірювання температури та відбір проб, зварювання, розпилення. Для деяких заплених та важких операцій у металургійній промисловості роботи використовуються на таких операціях, як змішування, укладання та регенерація, а також прибирання цехів на заводах із виробництва сировини, палива та допоміжних матеріалів. Використання роботів для заміни ручних операцій може захистити працівників від небезпечного середовища, а також покращити стандарти роботи та ефективність праці.

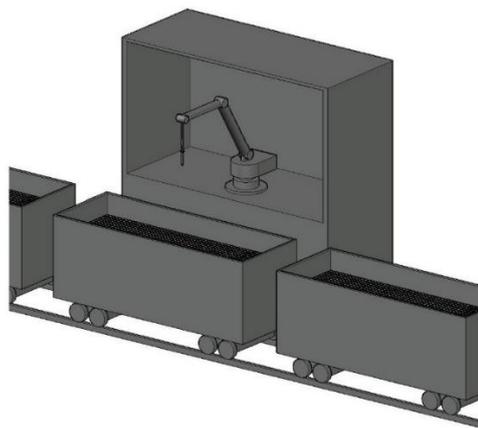
Для стандартних операцій, таких як перевірка якості, вимірювання температури та перевірка зразків, робототехнічні операції можуть уникнути неправильних суджень, хибних суджень і неточних вимірювань, спричинених людськими помилками, що сприяє реалізації стандартизованих операцій.

Можна здійснити оцифрування та інформатизацію традиційного виробництва за допомогою промислових роботів, а також використовувати комунікаційні можливості роботів для реалізації потоку даних, що значно покращує

своєчасність та точність передачі інформації на виробничих лініях.

Промисловий робот може бути використаний для відбору проб металевих концентратів на транспортних засобах. Це вирішує проблему низької ефективності, великих похибок і багатьох суперечок під час ручного відбору проб вагонів і поїздів. Перевагами застосування такого робота є безперервна цілодобова робота, що повністю замінює ручну роботу; інтелектуальне судження, відбір зразків за міжнародним чи державним стандартом, автоматична підготовка зразків, без нагляду; невелика площа та простий монтаж. Промисловий робот може входити в робототехнічну систему, яка містить робочий орган, руку для відбору проб, фотоелектричний датчик, ультразвуковий датчик, контролер, вбудоване програмне забезпечення для інтелектуального керування, машини для пакування зразків та основного кронштейна сталеві конструкції системи.

Система пробовідбірника матеріалу може використовувати 6-осьовий промисловий робот, а також 14-метрову (відповідно до вимог місця) напрямну для формування 7-осьового режиму руху. Напрямна рейка робота може встановлюватися вздовж руху каретки. Висота прямої рейки переважно така ж, як і висота каретки, тому вибірку можна проводити в будь-якому місці каретки (рис. 1).



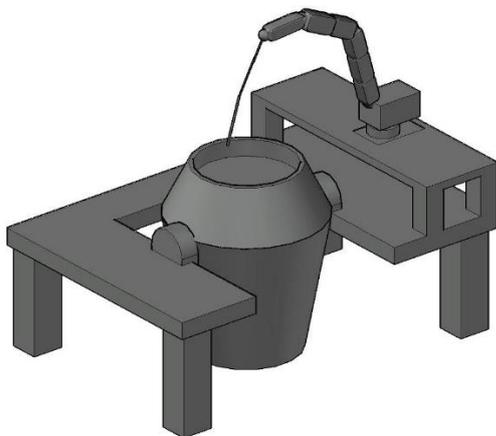
**Рис. 1. Робот пробовідбірника сировинного матеріалу в металургійній галузі**

Робототехнічна система автоматично може визначати місце розташування вагона, і користувачі можуть встановлювати правила відбору проб, наприклад кількість точок відбору проб у вагоні. Він має функцію автоматичного очищення головки для відбору проб, щоб запобігти прилипанню матеріалу та перехресному забрудненню.

Вимірювання температури та відбір проб є важливою ланкою в процесі виробництва сталі, але нині на сталеливарних заводах все ще здійснюється вручну. Актуальність застосування промислового робота для вимірювання температури та відбору проб зумовлена тим, що робоче середовище має високі температури та запылення; виникають опіки від бризок сталевого шлаку під час ручного вимірювання; відбувається нестабільний результат вимірювання та може виникати аварія на металургійному виробництві.

Оператор стоїть перед електричною піччю з 10-кілограмовим пістолетом для вимірювання температури та вставляє його у сталеплавильну піч із температурою 1500 градусів за Цельсієм для вимірювання температури та відбору проб [8].

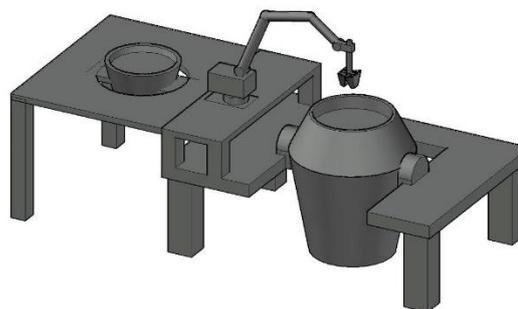
Перевагами робота для вимірювання температури розплавленого металу є гнучкість і зручність, економія часу, поліпшення робочого середовища та зменшення дублювання праці, уникнення людського втручання, підвищення ефективності і точності вимірювання температури та відбору проб (рис. 2).



**Рис. 2. Робот для вимірювання температури та відбору проб розплавленого металу**

Традиційне видалення шлаку ґрунтується на ручному спостереженні та контролі за операціями пов'язаного обладнання й покладається на ручний досвід для визначення та контролю шлаку та глибини видалення шлаку [9]. Це може призвести до тривалого виробництва, серйозних втрат заліза, надмірного або недостатнього видалення шлаку та відсутності стандарту щодо залишків заліза в ковші. Щоб допомогти промисловості вирішити ці проблеми, можна застосовувати роботизовану систему видалення шлаку (рис. 3). Роботизована система видалення шлаку є комплексною системою,

заснованою на інтелектуальних машинах для видалення шлаку, інтелектуальному аналізі, глибокому самонавчанні, нейронних мережах та інтелектуальному управлінні, а також може реалізувати дистанційне видалення шлаку, дистанційну роботу та обслуговування. За допомогою функції оцінки поверхні шлаку роботизована система видалення шлаку сама може керувати машиною для видалення шлаку, щоб вона рухалася відповідно до заданого шляху для реалізації автоматичного видалення шлаку. Це важливий продукт для інтелектуального виробництва та управління процесом у сталеливарній промисловості.



**Рис. 3. Роботизована система видалення шлаку**

Скребок для шлаку може мати підйом руки, опускання руки, обертання ліворуч, обертання праворуч, а також рухи підйому та скорочення руки скребка шлаку. Кожна дія оснащена датчиком зворотного зв'язку за положенням. Усі елементи керування скребком шлаку можуть працювати у замкнутому режимі. Цей метод керування може не тільки забезпечити безперебійну та надійну роботу обладнання, але й забезпечити точність позиціонування та відповідати вимогам системи. З протилежного боку телескопічного гідромотора на валу активної зірочки може бути встановлений безконтактний енкадер. Реєстрацією кількості обертів валу зірочки під час руху досягається мета вимірювання телескопічної відстані для забезпечення безпеки та надійності основного телескопічного руху.

Зовні масляного циліндра може бути встановлений датчик тягового шнура, який визначає хід розширення та стиснення масляного циліндра відповідно до довжини переміщення тягового шнура, а потім перетворює його на кут нахилу для досягнення мети керування кроком. Перегородка може бути використана для захисту шнура кодера від пилу. Можливе встановлення тросового енкадера на плече скребка шлаку. Різні кути повороту плеча

призведуть до різного переміщення мотузки. Роботизована система може обчислювати кут повороту скребка шлаку шляхом перетворення відстані для досягнення точного керування. На одній стороні масляного циліндра може бути встановлений канатний кодер, який піднімає весь скребок шлаку. Коли масляний циліндр працює, тросовий кодер матиме відповідне зміщення для вимірювання висоти підйому масляного циліндра.

Найвний спосіб змащування колеса спікального візка полягає в ручному очищенні, обслуговуванні та заповненні підшипникового вузла мастилом, коли спікальний візок зупинений [10].

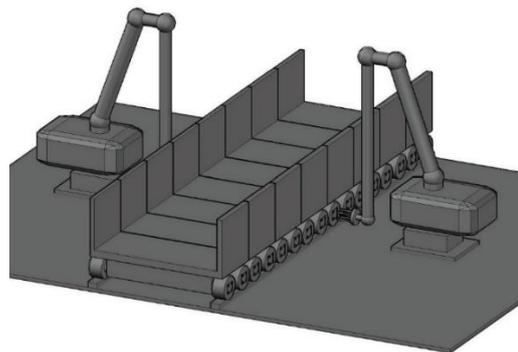
Однак за допомогою цього методу пил, такий як залізний порошок і залізні ошурки, що утворюються під час процесу трансмісії спікального візка, а також суха речовина, що утворюється в результаті змішування пилу та пилу з мастилом за умов високої температури, може викликати протікання мастила під час процесу впрскування мастила. Якщо мастило для колеса не потрапить в отвір у підшипниковий вузол, це призведе не лише до того, що підшипниковий вузол буде недостатньо змащений, але й до зношування осі колеса.

Коли колісна система візка для спікання зношується в гарячому робочому середовищі, це, швидше за все, спричинить деформацію компонентів колеса візка для спікання, прискорить процес зношування осі колеса та зрештою призведе до блокування колеса, а вісь колеса необхідно буде замінити.

Крім того, оскільки вісь колеса та втулка осі мають посадку з натягом, а втулка осі приварена до корпусу візка, зазвичай необхідно підняти весь візок для спікання з колії, щоб замінити на новий візок, що робить процес із заміни колісної осі трудомістким та довгим.

Водночас через посадку з натягом між віссю колеса і втулкою руйнівний силовий демонтаж зазвичай використовується в процесі заміни зношеної вісі колеса. Сильне розбирання призведе не тільки до подальшого пошкодження осі колеса, але й до пошкодження втулки осі, що, у свою чергу, збільшить витрати на ремонт колісних осей.

Тому необхідно застосовувати роботизовану систему очищення та змащування коліс візка для спікання, яка може завершити автоматичне очищення та автоматичне змащування системи коліс візка для спікання, не змінюючи наявну конструкцію колеса візка для спікання, щоб запобігти нагріванню та запиленню візка для спікання (рис. 4).



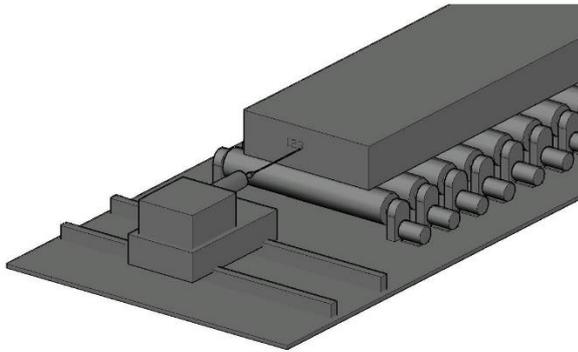
**Рис. 4. Система очищення та змащування коліс візка для спікання**

Дифузне робоче середовище спричиняє зношування колісної системи візка для спікання, де вартість модифікації обладнання низька, а гнучкість застосування обладнання та налагодження висока. Перевагами експлуатації такої роботизованої системи є те, що онлайн-заправка не впливає на роботу оригінальної системи на місці та може адаптуватися до змін швидкості в реальному часі на місці. Автоматично очищає маслозаливний отвір, ефективно запобігаючи та зменшуючи потрапляння пилу, такого як залізний порошок і залізна стружка, а також сухої речовини, утвореною сумішшю пилу та мастила, від прилипання до маслозаливного отвору та потрапляння на вісь колеса і компоненти підшипника через отвір для заливки масла, що спричиняє зношування. Положення заправного отвору визначається візуально, а зміщення заправної головки автоматично калібрується; конструкція є компактною, рух – гнучким, зручним і практичним, і він здатний до онлайн-автоматичної заправки та змащування коліс візка для спікання. Може використовувати невелику кількість мастила кілька разів, щоб запобігти надмірному розливу масла. За відсутності мастила в колесі, заправкою та станом засмічення можна судити за потоком і тиском оливи, а також можна видавати відповідні попередження. Під час заправки можна додати маслоприймальну камеру до заправного сопла, щоб переконатися, що колеса на місці є чистими. Кожне колесо позначено QR-кодом для забезпечення моніторингу в режимі реального часу стану всього колеса візка та запису життєвого циклу колеса. Якщо необхідно замінити колесо або візок, відповідне колесо можна ввести в систему за допомогою додаткового методу, щоб забезпечити унікальність ідентифікації колеса. Можна додати виявлення дефектів коліс і деформації підшипників. Роботизована

система може зберігати записи про заправку кожного колеса та статус колеса, а також відстежувати вихідні дані. Можна додати теплову інфрачервону камеру для моніторингу температури коліс у режимі реального часу та спостерігати за аномальними змінами в колесах візка.

Високотемпературний лазерний маркувальний робот може застосовуватися на лінії виробництва прокату. Його можна розташувати наприкінці ланцюгового конвеєра, він може виконувати онлайн-лазерне маркування на торці прокату. Роботизована система може включати систему розпилення, систему розпізнавання символів, електронне керування тощо (рис. 5).

Спеціальна жаростійка фарба рівномірно і безперервно подається в трубопровід пістолета-розпилювача пневматичним мембранним насосом, а потім пістолетом-розпилювачем керує робот для розпилення ґрунтовки на торцеву поверхню.



**Рис. 5. Високотемпературний лазерний маркувальний робот**

Роботизована система може розпізнавати центр і відстань до торця та направляє робота для виконання лазерного плавлення. Променевий розпилювальний друк з подальшим фотографуванням торця лазерного напилення дає змогу ідентифікувати символи для архівування.

Технічний прогрес не стоїть на місці, поступово з'являються нові технології та інновації, які застосовуються в різних сферах життя, в тому числі на промислових виробництвах.

В ході дослідження були проаналізовані шкідливі і небезпечні умови праці та стандартні операції, які виконуються людьми, такі як вимірювання температури та відбір проб перед сталеплавильною піччю, видалення ливарного шлаку, перевірка та відбір проб, розпилення номерів заготовок, розпилювальний друк сталевих рулонів, об'єднання, роз'єднання, маркування. Визначені роботи, виконання яких можливо роботизувати, замінивши ручну працю промисловими роботами на металургійних підприємствах. Запропоновані промислові роботи, а саме робот пробовідбірника сировинного матеріалу в металургійній галузі, робот для вимірювання температури та відбору проб розплавленого металу, роботизована система видалення шлаку, система очищення та змащування коліс візка для спікання, високотемпературний лазерний маркувальний робот, для заміни ручної праці на шкідливих та небезпечних ділянках виробництва, представлені рекомендації з використання запропонованих промислових роботів на металургійних підприємствах.

Проаналізовано та визначено, що використання промислових роботів дасть змогу значно зменшити інтенсивність професійних захворювань та уникнути травм на виробництві. Це дасть можливість захистити працівників від небезпечного середовища, покращити стандарти роботи та ефективність праці.

Під час застосування промислових роботів виключаються помилки з неточними вимірюваннями, присутні людському фактору. Вони швидко оцифровують і подають інформацію традиційного виробництва за допомогою комунікаційних можливостей роботів, що значно покращує своєчасність та точність передачі інформації на виробничих лініях.

Промислові роботи моніторять обладнання в режимі реального часу, що зменшує додаткові витрати на ремонти, а також зменшує кількість аварійних зупинок обладнання.

Проведений аналіз дав змогу визначити переваги експлуатації промислових роботів на металургійних заводах.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Матухно О.В., Шматков Г.Г., Бєлоконь К.В., Сибір А.В. Дослідження екологічної безпеки металургійного виробництва методом оцінки життєвого циклу. *Екологічні науки*. 2020. Т. 1. № 2. С. 32–37.
2. Бабаченко О.І., Тубольцев Л.Г., Меркулов О.Є., Левченко Г.В. Науково-технічне забезпечення концепції сталого розвитку чорної металургії України. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Т. 36. С. 4–20.
3. Нестеров А.С., Чайка А.Л., Гармаш Л.І. Відділ металургії чавуну Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. Історія та сучасність. *Метал і лиття України*. 2019. Т. 314–316. № 7–9. С. 94–108.
4. Євтушенко Н.С., Пономаренко О.І., Твердохлебова Н.Є., Мезенцева І.О., Семенов Є.О., Євтушенко С.Д. Забезпечення безпечних умов праці для профілактики професійних захворювань працівників металургійного і ливарного виробництва. *Метал та лиття України*. 2022. Т. 30, № 3. С. 117–125.

5. Овчиннікова В.О., Дьяков М.І. Особливості інноваційної трансформації підприємств в умовах роботизації. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2022. № 80. С. 49–59.
6. Дорошенко В.С., Янченко О.Б. Підвищення ресурсоефективності ливарного виробництва за рахунок комплектації роботами конвеєрних та роторно-конвеєрних ліній. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2020. Т. 27. № 2. С. 179–186.
7. Pauliková A., Gyurák Babel'ová Z., Ubárová M. Analysis of the Impact of Human–Cobot Collaborative Manufacturing Implementation on the Occupational Health and Safety and the Quality Requirements. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Т. 18. № 4. С. 19–27.
8. Georgiev G., Todorov N., Grancharova A. Use of KUKA KR300 Industrial Robot in Electric Arc Furnace Operation. *2023 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, Varna, Bulgaria, 5–7 жовтня 2023 року. 2023.
9. Тогобицька Д.М., Белькова А.І., Степаненко Д.О., Поворотня І.Р., Греков С.В. Методика оцінки фізико-хімічної взаємодії в системі «метал-шлак» як кооперативного іонообмінного процесу під час рафінування сталі. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Т. 37. С. 271–286.
10. Anishchenko O.S., Takhtamysh I.V., Tarasiuk L.I. Вдосконалення конструкцій роликів вузлів спікальних та випалювальних візків. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2020. № 40. С. 104–113.

#### REFERENCES:

1. Matukhno, O.V., Shmatkov, G.G., Belokon, K.V., & Sybir, A.V. (2020). Doslidzhennia ekolohichnoi bezpeky metalurhiinoho vyrobnytstva metodom otsinky zhyttievoho tsykladu [Study of the environmental safety of metallurgical production by the life cycle assessment method]. *Ecological Sciences*, 1 (2), 32–37. [in Ukrainian]
2. Babachenko, O.I., Tuboltsev, L.G., Merkulov, O.Y., & Levchenko, G.V. (2022). Naukovo-tekhniche zabezpechennia kontseptsii staloho rozvytku chornoj metalurhii Ukrainy [Scientific and technical support of the Concept of sustainable development of black metallurgy of Ukraine]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 36, 4–20. [in Ukrainian]
3. Nesterov, A.S., Chaika, A.L., & Garmash, L.I. (2019). Viddil metalurhii chavunu Instytutu chornoj metalurhii im. Z.I. Nekrasova NAN Ukrainy. Istoriia ta suchasnist [Department of Cast Iron Metallurgy of Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine. History and Modernity]. *Metal and Casting of Ukraine*, 314–316 (7–9), 94–108. [in Ukrainian]
4. Yevtushenko, N.S., Ponomarenko, O.I., Tverdokhliebova, N.Y., Mezentseva, I.O., Semenov, Y.O., & Yevtushenko, S.D. (2022). Zabezpechennia bezpechnykh umov pratsi dlia profilaktyky profesiinykh zakhvoriuvan pratsivnykiv metalurhiinoho i lyvarnoho vyrobnytstva [Ensuring safe working conditions for the prevention of occupational diseases of workers in the metallurgical and foundry industries]. *Metal and Casting of Ukraine*, 30 (3), 117–125. [in Ukrainian]
5. Ovchynnikova V.O., Dyakov M.I. (2022). Osoblyvosti innovatsiinoi transformatsii pidpriemstv v umovakh robotyzatsii [Features of the innovative transformation of enterprises under the conditions of robotization]. *The Bulletin of Transport and Industry Economics*, (80), 49–59. [in Ukrainian]
6. Doroshenko, V.S., & Yanchenko, O.B. (2020). Pidvyshchennia resursoefektyvnosti lyvarnoho vyrobnytstva za rakhunok komplektatsii robotamy konveiernykh ta rotorno-konveiernykh liniy [Improving the resource efficiency of foundry due to the assembly of conveyor and rotor-conveyor lines by robots]. *Modern technology, materials and design in construction*, 27 (2), 179–186. [in Ukrainian]
7. Pauliková, A., Gyurák Babel'ová, Z., & Ubárová, M. (2021). Analysis of the Impact of Human-Cobot Collaborative Manufacturing Implementation on the Occupational Health and Safety and the Quality Requirements. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (4), 19–27.
8. Georgiev, G., Todorov, N., & Grancharova, A. (2023). Use of KUKA KR300 Industrial Robot in Electric Arc Furnace Operation. *2023 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*. IEEE.
9. Togobitskaya, D.M., Belkova, A.I., Stepanenko, D.O., Povortnia, I.R., & Grekov, S.V. (2023). Metodyka otsinky fizyko-khimichnoi vzaiemodii v systemi "metal-shlak" yak kooperatyvnoho ionoobminnoho protsesu pid chas rafinuvannia stali [Method for assessing physical-chemical interaction in the metal-slag system as a cooperative ion-exchange process in steel refining]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 271–286. [in Ukrainian]
10. Anishchenko, O.S., Takhtamysh, I.V., & Tarasiuk, L.I. (2020). Improvement of roller assemblies' designs of pellet and roasting carriages [Vdoskonalennia konstrukttsii rolykovykh vuzliv spikalnykh ta vypaliuvalnykh vizkiv]. *Reporter of the Priazovskyi state technical university. Section: Technical sciences*, (40), 104–113. [in Ukrainian]

## МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.068.35.4

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-5>

### ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ ЧАСТИНОК ГЛИНОЗЕМУ У РАФІНУВАЛЬНОМУ ШЛАКУ ПРОМІЖНОГО КОВША

**Єфімова Вероніка Гаріївна,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри фізичної хімії  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID ID: 0000-0003-2372-8398

**Смірнов Олексій Миколайович,**

доктор технічних наук, професор, завідувачий відділом  
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів  
Національної академії наук України  
ORCID ID: 0000-0001-5247-3908

**Смірнов Юрій Олексійович,**

кандидат економічних наук, доцент, старший науковий співробітник  
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів  
Національної академії наук України  
ORCID ID: 0009-0009-0479-5828

*У роботі показано, що впровадження металургії проміжного ковша мало один з найзначніших розвитків сталеплавильного виробництва за останні десятиріччя. Зазначено, що метою вторинного виплавляння сталі є виробництво продукту високої якості та економічно обґрунтовано. Висвітлено, що однією з основних функцій проміжного ковша є мінімізація кількості і розмірів неметалевих включень у сталевих виробках шляхом переходу їх з металеві фази у шлак.*

*Метою дослідження було встановлення кінетичних параметрів процесу розчинення неметалевих включень у шлаку проміжного ковша, а саме лімітуючої стадії процесу та величини енергії активації.*

*Проведено дослідження процесу розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$ , вага яких становила 0,25 г, чистота – 99,9%, а діаметр –  $500 \pm 0,05$  мкм, у шлаку змінного складу  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-Fe_xO$ .*

*Досліджено поведінку розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  за допомогою апарату, який був оснащений відеокамерою та оптичним мікроскопом за температури 1550, 1575 та 1600°C, а час експерименту становив 120, 240 і 360 секунд для кожної умови.*

*Аналітичними дослідженнями показано, що процес розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  можна описати як кінетику гетерогенних процесів, так і кінетику гомогенних хімічних реакцій.*

*У дослідженні показано, що контроль швидкості розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  може бути описаний законами масопереносу на межі поділу двох рідких фаз: розплав сталі – шлак. Встановлено математичну залежність процесу розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$ , за допомогою якої було розраховано швидкість розчинення.*

*Енергію активації було визначено аналітичним шляхом з використанням рівняння Арреніуса. В результаті проведених досліджень визначено швидкість розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  та встановлено, що вона зростає зі зростанням вмісту  $Fe_xO$  у шлаку проміжного ковша та температури.*

*Встановлено, що розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  відбувається на межі поділу фаз, що підтверджується даними скануючої електронної мікроскопії. Визначено енергію активації процесу та показано, що процес розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  у шлаках різного складу відбувається у кінетичній області.*

*Показано, що збільшення вмісту  $Fe_xO$  у шлаку проміжного ковша призводить до зростання енергії активації та більшої залежності процесу розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  від температури.*

**Ключові слова:** проміжний ківш, шлак, неметалеві включення, кінетична область, дифузійна область, енергія активації.

**Yefimova Veronika, Smirnov Oleksiy, Smirnov Yurii. Determination of the kinetic parameters of the dissolution process of aluminum particles in the refining slag of the intermediate bucket**

The work shows that the introduction of intermediate ladle metallurgy was one of the most significant developments in steelmaking over the past decades. It is noted that the purpose of secondary steel smelting is the production of a high-quality and economically justified product. It is highlighted that one of the main functions of the intermediate ladle is the minimization of the number and size of non-metallic inclusions in steel products by their transition from the metal phase to slag.

The purpose of the study was to establish the kinetic parameters of the process of dissolution of non-metallic inclusions in the slag of the intermediate ladle, namely, the limiting stage of the process and the value of the activation energy.

The process of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles, the weight of which was 0.25 g, the purity of 99.9% and the diameter of  $500 \pm 0.05 \mu m$ , in the slag of variable composition  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-Fe_xO$  was studied.

The dissolution behavior of  $Al_2O_3$  solid particles was investigated using an apparatus that was equipped with a video camera and an optical microscope at temperatures of 1550, 1575, and 1600 °C, and the experimental time was 120, 240, and 360 seconds for each condition.

Analytical studies have shown that the process of dissolving  $Al_2O_3$  solid particles can be described both by the kinetics of heterogeneous processes and by the kinetics of homogeneous chemical reactions.

The study shows that the control of the rate of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles can be described by the laws of mass transfer at the boundary of the separation of two liquid phases, steel melt – slag.

The mathematical dependence of the process of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles was established, with the help of which the rate of dissolution was calculated. The activation energy was determined analytically using the Arrhenius equation.

As a result of the research, the rate of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles was determined and it was established that it increases with the increase in the content of  $Fe_xO$  in the slag of the intermediate ladle and the temperature. It was established that the dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles occurs at the boundary of phase separation, which is confirmed by scanning electron microscopy data.

The activation energy of the process was determined and it was shown that the process of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles in slags of different composition occurs in the kinetic region. It is shown that an increase in the content of  $Fe_xO$  in the slag of the intermediate ladle leads to an increase in the activation energy and a greater dependence of the process of dissolution of  $Al_2O_3$  solid particles on temperature.

**Key words:** intermediate ladle, slag, non-metallic inclusions, kinetic region, diffusion region, activation energy.

**Вступ.** Відповідно до світових стандартів до 2030 року у сталеливарній промисловості зростає зацікавленість у застосуванні електро-дугових печей, які викидають менше вуглекислого газу, ніж доменні печі [1]. Під час використання електродугових печей скорочується час окислювального рафінування [2], що приводить до зростання вмісту кисню у сталі та спричиняє такі проблеми, як корозія. Отже, процес розкислення є необхідною операцією, що знижує вміст кисню у розплаві сталі. Відомо, що процес розкислення переважно здійснюється з використанням алюмінію. Продуктом розкислення є включення  $Al_2O_3$ , що призводять до дефекту сталевої продукції. Отже, видалення включень  $Al_2O_3$  у шлакову фазу є актуальною задачею.

Відомо, що видалення частинок глинозему відбувається двома способами. Перший – це обробка розплаву Ca, в результаті чого включення  $Al_2O_3$  переводяться з твердої фази у рідку  $CaO-Al_2O_3$  [3]. Однак за застосування цього методу є недолік взаємодії з вогнетривами футерівки, що викликає корозію вогнетривів [4]. Другий спосіб полягає у спливанні та поглинанні частинок  $Al_2O_3$  шлаковою фазою [5]. Отже, в останні 30 років більшість досліджень щодо видалення неметалевої фази з розплаву

сталі належать до вивчення процесів розчинення включень у рафінувальному шлаку.

Так, у дослідженнях [6] вивчалася поведінка розчинення частинок  $Al_2O_3$  у шлаку  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$  зі зміною температури. Ці дослідження показали, що кінетика процесу розчинення частинок  $Al_2O_3$  відбувається за рахунок дифузійних процесів, тоді як розчинення частинок  $MgO$  підкоряється кінетичним закономірностям.

Дослідження [7] були присвячені розчиненню частинок  $Al_2O_3$  у шлаку  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  змінного складу за різної температури. Ці дослідження показали, що стадія, яка лімітує загальний процес, є дифузійною, і вона збільшується за зростання співвідношення у складі шлаку  $CaO/Al_2O_3$  та  $Al_2O_3/SiO_2$ .

Дослідження [8] вивчали поведінку розчинення частинок  $Al_2O_3$  та  $MgO$  у шлаку  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$  зі змінною основністю. Ці дослідження показали, що частинки  $Al_2O_3$  та  $MgO \cdot Al_2O_3$  повільно розчиняються в шлаку з низькою основністю, а швидкість розчинення зростає зі зниженням в'язкості шлаку.

У науковій роботі [9] визначалася поведінка розчинення частинок  $Al_2O_3$  у шлаку  $CaO-SiO_2-Al_2O_3-Fe_xO$  зі змінним вмістом  $Fe_xO$ . Дані досліджень показали, що зростання вмісту  $Fe_xO$

становить від 0 до 20 мас.%, швидкість розчинення частинок  $Al_2O_3$  збільшується за рахунок зниження в'язкості. Однак, коли вміст  $Fe_xO$  збільшився до 30 мас.%, швидкість розчинення не змінюється за рахунок утворення нової фази на межі поділу фаз: частинка  $Al_2O_3$  – розплав металу.

Дані роботи [10] вивчали поведінку розчинення частинок  $Al_2O_3$  у шлаку  $CaO-Al_2O_3-Fe_xO-MgO-SiO_2$  зі змінним складом  $Fe_xO$ . Результати роботи свідчать про те, що зростання температури та вмісту  $Fe_xO$  призводить до зростання розчинності частинок  $Al_2O_3$ . Дані цієї роботи показали, що процес розчинення неметалевої фази контролюється кінетичною областю, оскільки енергія активації процесу становить 193,6 кДж/моль.

Дані роботи [11] досліджували кінетичні параметри процесу розчинення частинок  $Al_2O_3$  в шлаку  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  зі змінним складом  $Al_2O_3$ . В роботі встановлено, що зростання вмісту  $Al_2O_3$  призводить до зростання швидкості розчинення, а енергія активації лежить в межах від 320 до 490 кДж/моль, залежно від вмісту  $Al_2O_3$  в шлаку.

Однак, оскільки в шлаках електродугових печей як сировина використовується брутт  $Fe$ , вміст  $Fe_xO$  буде зростати. Отже, шлак, що використовується в електродугових печах, включає велику кількість  $Fe_xO$ .

Проте відомо мало досліджень щодо поведінки розчинення неметалевих включень в шлаках, що містять  $Fe_xO$ . Крім того, температура електродугового шлаку лежить в межах від 1550°C до 1700°C.

Отже, дослідження кінетичних параметрів процесу розчинення частинок  $Al_2O_3$  у шлаку, що містить  $Fe_xO$ , за змінної температури є актуальним.

**Матеріали та методи.** У наших дослідженнях було використано тверді частинки  $Al_2O_3$ , середня вага частинок становила 0,25 г, чистота – 99,9%, а діаметр –  $500 \pm 0,05$  мкм.

У табл. 1 наведено хімічний склад і основність шлаку, який ми використовували у дослідженнях. Основність було зафіксовано на рівні 1, а вміст  $Fe_xO$  змінювався від 10 до

20 мас.%. Кількість шлаку, який використовувався у нашому експерименті, становила 4 мг. Шлак було отримано шляхом змішування порошку  $CaO$ , отриманого прожарюванням  $CaCO_3$  за 1200°C з  $Al_2O_3$  і порошком  $Fe_xO$  та подальшим плавленням їх у високочастотній індукційній печі.

У цьому дослідженні за поведінкою розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  спостерігали за допомогою апарату, який був оснащений відеокамерою та оптичним мікроскопом.

Температури експерименту становили 1550, 1575 та 1600°C, а час експерименту становив 120, 240 і 360 секунд для кожної умови. Експерименти проводились щонайменше три рази для кожної умови відтворюваності.

Розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  у рідкому шлаку можна описати за допомогою гомогенної хімічної реакції на межі поділу фаз  $Al_2O_{3(mв.)} \rightarrow Al_2O_{3(p.)}$  та масообмінних процесів, що відбуваються у рідкій фазі  $Al_2O_{3(p.)} \rightarrow Al_2O_{3(p.)}$ .

Звідси випливає, що розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  у рідкому шлаку можна описати законами кінетики гомогенних хімічних реакцій чи за допомогою законів масопереносу у рідкому середовищі, якщо на межі поділу фаз «розплав сталі – шлакова фаза» не утворюється ніяких проміжних хімічних сполук.

Відомо, що розчинення неметалевої фази у рідкому шлаку не супроводжується утворенням нових та проміжних хімічних сполук. Отже, контроль швидкості розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  у наших дослідженнях може бути описаний законами масопереносу на межі поділу двох рідких фаз: розплав сталі – шлак.

Отже, швидкість розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  можна характеризувати масообмінним потоком та описати рівнянням масопереносу таким чином:

$$J = -k(C_{cm} - C_w), \quad (1)$$

де  $J$  – масообмінний потік, моль/м<sup>3</sup>;  $k$  – коефіцієнт масопередачі у шлаку, см/с;  $C_{ст}$  та  $C_{ш}$  – концентрація включень у розплаві сталі та шлаковій фазі;  $(C_{ст} - C_{ш})$  є рушійною силою розчинення.

Таблиця 1

Хімічний склад шлаку, мас.%

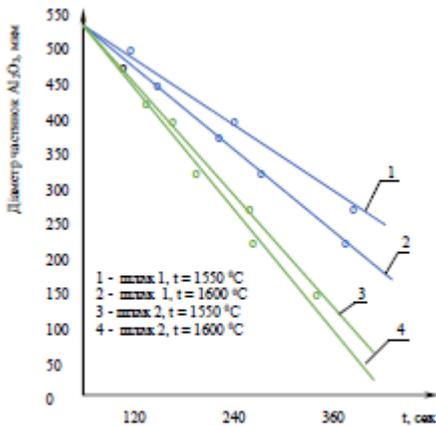
| № шлаку | CaO  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>x</sub> O | Основність |
|---------|------|------------------|--------------------------------|-------------------|------------|
| 1       | 47,5 | 47,5             | 5                              | 0                 | 1          |
| 2       | 42,6 | 47,4             | 5                              | 5                 | 1          |
| 3       | 43,3 | 41,7             | 5                              | 10                | 1          |
| 4       | 45,8 | 34,2             | 5                              | 15                | 1          |

Якщо розчинені частинки  $Al_2O_3$  мають сферичну форму, то рівняння (1) для швидкості розчинення частинок глинозему можна записати так:

$$\frac{dr}{dt} = -k(C_{cm} - C_w) \cdot \frac{M}{\rho}, \quad (2)$$

де  $r$  – радіус твердих частинок  $Al_2O_3$ , см;  $t$  – час, с;  $M$  – молярна маса твердих частинок  $Al_2O_3$ , г/моль;  $\rho$  – густина твердих частинок  $Al_2O_3$ , г/см<sup>3</sup>.

Швидкість розчинення частинок глинозему нами було розраховано з використанням рівняння (2) за експериментальними даними (рис. 1) із застосуванням програмного пакета FactSage. Фізичні властивості та коефіцієнти масопередачі для кожної температури наведено у табл. 2.



**Рис. 1. Швидкість розчинення частинок  $Al_2O_3$  в залежності від вмісту  $Fe_xO$  та температури**

Дані табл. 2 свідчать про те, що коефіцієнт масопередачі зростає з підвищенням температура плавлення.

Енергію активації розчинення твердих частинок  $Al_2O_3$  можна визначити аналітичним шляхом. У нашому дослідженні швидкість розчинення частинок  $Al_2O_3$  вимірювалась за декілька температур  $i$ , відповідно, розраховувався

коефіцієнт масопередачі. З використанням рівняння Арреніуса ми побудували графік залежності логарифми коефіцієнта масопередачі від оберненої температури. Це дало нам змогу графічно визначити енергію активації процесу розчинення графічним шляхом:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right), \quad (3)$$

де  $k_0$  – передекспоненціальна стала;  $R$  – універсальна газова стала, Дж/моль·К;  $T$  – температура, К;  $E_A$  – енергія активації, Дж/моль.

Логарифмування рівняння (3) дасть нам змогу знайти енергію активації як кутовий коефіцієнт рівняння прямої у координатах логарифм коефіцієнта масопередачі від оберненої температури:

$$\ln k = -\frac{E_A}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln k_0. \quad (4)$$

Визначені у такий спосіб значення енергії активації наведені на рис. 2.

Отже, як свідчать дані рис. 2, розчинність твердих частинок  $Al_2O_3$  більшою мірою залежить від температури для шлаку складу 2.

**Висновки.** У дослідженні поведінку розчинення  $Al_2O_3$  вивчали шляхом зміни складу шлаку за температури 1550–1600 °C. З проведених досліджень впливають такі висновки.

1. Швидкість розчинення частинок  $Al_2O_3$  зростає зі зростанням вмісту  $Fe_xO$  та температури.

2. Розчинення частинок  $Al_2O_3$  відбувається на межі поділу фаз, що підтверджується даними скануючої електронної мікроскопії.

3. Визначено енергію активації процесу розчинення частинок  $Al_2O_3$  у шлаках різного складу. Дослідження свідчать про те, що зростання у складі шлаку вмісту  $Fe_xO$  призводить до збільшення енергії активації процесу, а також більшої залежності від температури.

Наступним етапом наших досліджень буде вивчення розчинення твердих частинок  $MgO$  у шлаках різного хімічного складу.

Таблиця 2

**Фізичні властивості та коефіцієнт масопередачі залежно від температури**

| № шлаку | t, °C | Рушійна сила розчинення, моль/м <sup>3</sup> | Густина шлаку, ρ, кг/м <sup>3</sup> | Швидкість розчинення, $\frac{dr}{dt}$ , см/с | Коефіцієнт масопередачі, κ, см/с |
|---------|-------|--|-------------------------------------|--|----------------------------------|
| Шлак 1  | 1550  | 10,79  | 2654                                | $5,64 \cdot 10^{-5}$                         | $1,48 \cdot 10^{-7}$             |
| Шлак 2  | 1600  | 11,56  | 2648                                | $9,81 \cdot 10^{-5}$                         | $2,15 \cdot 10^{-7}$             |
| Шлак 3  | 1550  | 11,15  | 2853                                | $1,20 \cdot 10^{-4}$                         | $3,24 \cdot 10^{-7}$             |
| Шлак 4  | 1600  | 11,83  | 2835                                | $5,74 \cdot 10^{-4}$                         | $3,92 \cdot 10^{-7}$             |

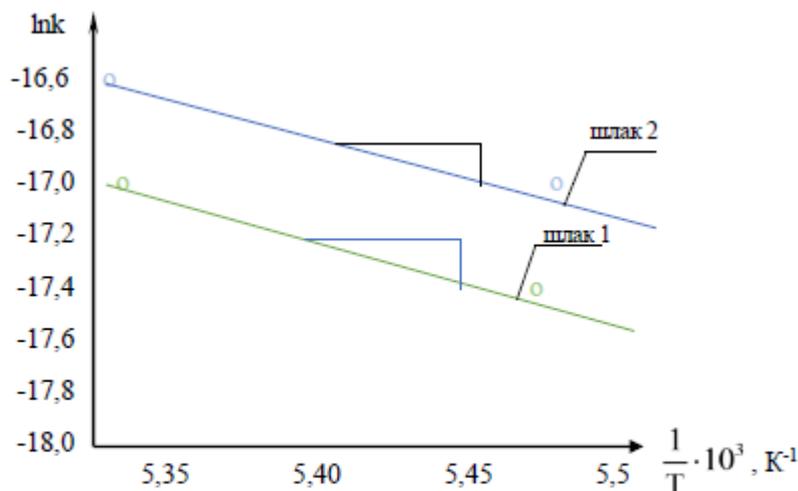


Рис. 2. Графічне визначення енергії активації, з використанням рівняння Арреніуса.  
Шлак 1 –  $E_A = 160$  кДж/моль. Шлак 2 –  $E_A = 190$  кДж/моль

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Fan Z., Friedmann S.J. Low-carbon production of iron and steel. *Technology options, economic assessment, and policy*. 2021. № 6. P. 829–862.
2. Holappa L., Kekkonen M., Louhenkilpi S., Hagemann R., Schröder C., Scheller P. Active tundish slag. *Steel Research International*. 2013. Vol. 84. P. 638–648.
3. Chen G., He S., Wang Q. Dissolution behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> into tundish slag for high-al steel. 2020. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 9. P. 11311–11318.
4. Shi G.-Y., Zhang T.-A., Dou Z.-H., Niu, L.-P. Dissolution behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions in CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based slag representing aluminothermic reduction slag. 2020. *Crystals*. Vol. 10. P. 1–12.
5. Lee S., Chung Y. The effect of C content in MgO–C on dissolution behavior in CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag. 2022. *Ceramics International*. Vol. 48. P. 26984–26991.
6. Kim Y., Kashiwaya Y., Chung Y. Effect of varying Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents of CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> slags on lumped MgO dissolution. 2020. *Ceramics International*. Vol. 46. P. 6205–6211.
7. Ren C., Zhang L., Zhang J., Wu S., Zhu P., Ren Y. In Situ Observation of the Dissolution of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles in CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> Slags. 2021. *Metallurgical and materials transactions B*. Vol. 52. P. 3288–3301.
8. Holappa L., Kekkonen M., Louhenkilpi S., Hagemann R., Schröder C., Scheller P. Active tundish slag. 2013. *Steel Research International*. Vol. 84. P. 638–648.
9. Um H., Yeo S., Kang Y., Chung Y. The effect of Fe<sub>x</sub>O content on dissolution behavior of an alumina inclusion in CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–Fe<sub>x</sub>O slag by a single hot thermocouple technique. 2022. *Ceramics International*. Vol. 48. P. 35301–35309.
10. Park Y.-J., Cho Y.-M., Cha W.-Y., Kang Y.-B. Dissolution kinetics of alumina in molten CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe<sub>t</sub>O–MgO–SiO<sub>2</sub> oxide representing the RH slag in steelmaking process. 2020. *Journal of American Ceramic Society*. Vol. 103. P. 2210–2224.
11. Yeo S., Um H., Chung Y. The Effect of Alumina Activity on Dissolution Behavior of Alumina Particles in CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> Slags. 2021. *Metallurgical and materials transactions B*. Vol. Metallurgical and materials transactions B. Vol. 52. P. 3938–3945.

#### REFERENCES:

1. Fan Z., Friedmann S.J. (2021). Low-carbon production of iron and steel. *Technology options, economic assessment, and policy*. № 6. P. 829–862.
2. Holappa L., Kekkonen M., Louhenkilpi S., Hagemann R., Schröder C., Scheller P. (2013). Active tundish slag. *Steel Research International*. Vol. 84. P. 638–648.
3. Chen G., He S., Wang Q. (2020). Dissolution behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> into tundish slag for high-al steel. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 9. P. 11311–11318.
4. Shi G.-Y., Zhang T.-A., Dou Z.-H., Niu, L.-P. (2020). Dissolution behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions in CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based slag representing aluminothermic reduction slag. *Crystals*. Vol. 10. P. 1–12.

5. Lee S., Chung Y. (2022). The effect of C content in MgO–C on dissolution behavior in CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag. *Ceramics International*. Vol. 48. P. 26984–26991.
6. Kim Y., Kashiwaya Y., Chung Y. (2020). Effect of varying Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> slags on lumped MgO dissolution. *Ceramics International*. Vol. 46. P. 6205–6211.
7. Ren C., Zhang L., Zhang J., Wu S., Zhu P., Ren Y. (2021). In Situ Observation of the Dissolution of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles in CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Slags. *Metallurgical and materials transactions B*. Vol. 52. P. 3288–3301.
8. Holappa L., Kekkonen M., Louhenkilpi S., Hagemann R., Schröder C., Scheller P. (2013). Active tundish slag. *Steel Research International*. Vol. 84. P. 638–648.
9. Um H., Yeo S., Kang Y., Chung Y. (2022). The effect of Fe<sub>x</sub>O content on dissolution behavior of an alumina inclusion in CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>x</sub>O slag by a single hot thermocouple technique. *Ceramics International*. Vol. 48. P. 35301–35309.
10. Park Y.-J., Cho Y.-M., Cha W.-Y., Kang Y.-B. (2020). Dissolution kinetics of alumina in molten CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>1</sub>O-MgO-SiO<sub>2</sub> oxide representing the RH slag in steelmaking process. *Journal of American Ceramic Society*. Vol. 103. P. 2210–2224.
11. Yeo S., Um H., Chung Y. (2021). The Effect of Alumina Activity on Dissolution Behavior of Alumina Particles in CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Slags. *Metallurgical and materials transactions B*. Vol. *Metallurgical and materials transactions B*. Vol. 52. P. 3938–3945.

УДК 669.187.2.036.538

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-6>

## АНАЛІЗ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ФУТЕРІВКИ ІНДУКЦІЙНИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

**Кухар Володимир Валентинович,**

доктор технічних наук, професор,  
проректор з науково-дослідної роботи,  
професор кафедри металургії, матеріалознавства і організації виробництва  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

**Малій Христина Василівна,**

кандидат технічних наук,  
керівник науково-дослідного департаменту,  
доцент кафедри металургії, матеріалознавства і організації виробництва  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0002-9046-4268

**Кустіков Владислав Валерійович,**

здобувач вищої освіти, гр. 136С-23-1м  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

*Індукційні сталеплавильні печі мають суттєвий потенціал у металургійній промисловості, оскільки вони дають змогу швидко та ефективно проводити плавку, зокрема сталі, з використанням принципу індукції. Використання таких агрегатів сприяє покращенню екологічних показників у виробництві та реалізації концепції «зеленої сталі» під час переробки заліза прямого відновлення. Індукційні печі є більш енергоефективними порівняно з традиційними печами, такими як дугові печі, через знижений час плавлення. Це сприяє зменшенню викидів парникових газів, таких як вуглекислий газ, та зменшує вплив на зміну клімату. Індукційні печі дають змогу зменшити витрати на електроенергію порівняно з іншими видами електричних печей. Це допомагає знизити використання природних ресурсів та викиди шкідливих речовин. Індукційні печі можуть бути легко налаштовані для переробки вторинної сировини – металевих відходів. Це сприяє зменшенню відходів та сприяє принципам циркулярної економіки. Поміж очевидних переваг індукційних сталеплавильних тигельних печей, серед яких також широкі можливості отримання однорідного за хімічним складом сталевого розплаву, відомі нагальні недоліки, що виникають у зв'язку з особливостями перемішування, потоками рідкого металу та зниженою стійкістю футерівки. У дослідженні розглянуто конструкцію та принцип дії індукційних плавильних тигельних агрегатів. Проаналізовано умови експлуатації та виходу з ладу кислотої, основної та нейтральної футерівки. Висвітлено ключові аспекти функціонування індукційних сталеплавильних печей, зосереджено увагу на виявленні причин низької вогнетривкості та шлакотривкості їх тиглів внаслідок інтенсивної взаємодії гарячого рідкого розплаву з футерівкою. Із застосуванням літературних джерел визначено основні методи підвищення стійкості тиглів: вибір матеріалу тигля, забезпечення теплоізоляції та охолодження, керування температурними режимами, оптимізація процесу плавлення та конструкції тигля, моніторинг зношування та деформацій, регулярне технічне обслуговування і ремонт, застосування захисних покриттів, управління електромагнітним полем печі. Розкрито сутність кожного з цих методів із наведенням конкретних виробничих прикладів. Головним результатом проведеного дослідження є систематизація проаналізованих методів підвищення стійкості футерівки в індукційних сталеплавильних печах. Проведений аналіз дає змогу в перспективі визначити оптимальні методи контролю стану футерівки та вибрати виробничі стратегії підвищення стійкості тиглів, враховуючи конкретні умови виробництва.*

**Ключові слова:** індукційна сталеплавильна піч, тигель, підвищення стійкості, футерівка, розплав.

***Kukhar Volodymyr, Malii Khrystyna, Kustikov Vladyslav. Analysis and systematization of ways to increase the stability of the lining of induction steel melting furnaces***

Induction steelmaking furnaces have significant potential in the steel industry, as they allow for fast and efficient melting, including of steel, using the principle of induction. The use of such units helps to improve environmental performance in production and implement the green steel concept when processing direct reduced iron. Induction furnaces are more energy-efficient than traditional furnaces, such as arc furnaces, due to their shorter melting times. This helps to reduce greenhouse gas emissions, such as carbon dioxide, and reduces the climate change impact.

Induction furnaces reduce energy costs compared to other types of electric furnaces. This helps to reduce the use of natural resources and emissions. Induction furnaces can be easily configured to process recyclable materials, such as metal waste. This helps to reduce waste and contributes to the principles of a circular economy. Among the obvious advantages of induction crucible steelmaking furnaces, including the wide possibilities of producing a homogeneous steel melt in terms of chemical composition, there are also urgent disadvantages arising from the peculiarities of mixing, liquid metal flows and reduced lining stability. This study considers the design and principles of operation of induction crucible melting units. The operating conditions and failures of acid, basic, and neutral linings are analyzed. The key aspects of the functioning of induction steelmaking furnaces are highlighted, with a focus on identifying the causes of low refractoriness and slag resistance of their crucibles due to the intensive interaction of the hot liquid melt with the lining. Using literature sources, the main methods of increasing the stability of crucibles are identified: selection of crucible material, provision of thermal insulation and cooling, control of temperature conditions, optimization of the melting process and crucible design, monitoring of wear and deformation, regular maintenance and repair, application of protective coatings, and control of the furnace electromagnetic field. The essence of each of these methods is revealed with specific production examples. The main result of the study is the systematization of the analyzed methods of increasing the lining stability in induction steelmaking furnaces. The analysis makes it possible to determine the optimal methods for monitoring the lining condition and select production strategies for improving crucible stability, taking into account specific production conditions.

**Key words:** induction steelmaking furnace, crucible, stability improvement, lining, melt.

Серед обмежень індукційної плавки, що заважають переходу на виплавку в індукційних печах, називають низьку стійкість їх футерівки [1]. Індукційні сталеплавильні агрегати характеризуються значною продуктивністю та успішно застосовуються для виплавки відносно невеликих об'ємів (від 5 кг до 60 т) високоякісних сталей у виробничих та лабораторних умовах. З технічної літератури відомі технології виплавки в індукційних печах високолегованих жаростійких сталей [2], конструкційних та низьковуглецевих сталей [3], кольорових металів [4] і сплавів спеціального призначення [5].

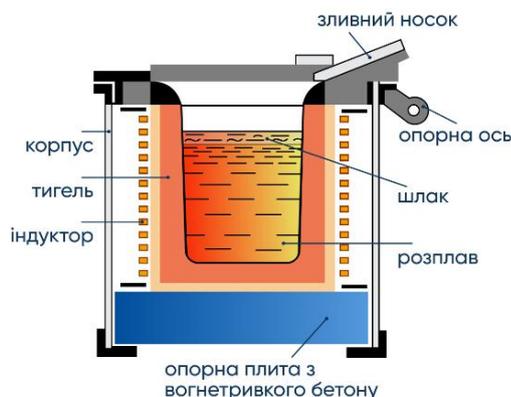
Особливістю роботи індукційної тигельної печі є подібність до функціонування трансформатора, коли первинною обмоткою є індуктор, а вторинною виступає матеріал у тиглі, розміщеним у центрі індуктора, який заживлюється від високочастотного генератора перемінного струму. Завдяки такій конструкції на метал, що розплавляється під дією токів Фуко, діють радіальні сили, направлені до центру ванни

розплавленого металу [6]. Дія таких сил приводить до витиснення рідкого металу по вертикальній осі тигля вгору та вниз, що сприяє електродинамічному перемішуванню шарів металу, забезпечуючи досягнення хімічної однорідності розплаву та флотації неметалічних включень. Активна циркуляція рідкого металу позитивно впливає на однорідність хімічного складу металів, що виплавляють, але негативно відбивається на такому показнику, як стійкість футерівки індукційних печей. Футерівка розташовується між рідким металом та індуктором (рис. 1), і, вочевидь, чим товще футерування печі, тим менший магнітний потік проникає в метал і тим нижче ефективність використання електроенергії під час плавки, тому товщина футерування має обмеження [7].

Тигель індукційної печі (рис. 1, б) виготовляють методами набивання або викладання вогнетривким матеріалом (цеглою). Тигель безпосередньо розташований в індукторі, який являє



а



б



в

Рис. 1. Розливка (а), схема (б) та зовнішній вигляд (в) індукційної тигельної плавильної печі

собою водоохолоджувану спіраль з мідної трубки з визначеною кількістю витків.

Набивний тигель з вогнетривкого порошкового матеріалу закріплюють у корпусі та встановлюють на плиті (основі) з вогнетривкого бетону. Випуск виплавленого металу відбувається через зливний носок під час повороту печі разом з корпусом відносно опорної осі [7]. Через фізичні особливості генерації тепла безпосередньо в металі підвищення температури плавки обмежується переважно стійкістю самого плавильного тигля. Тигель виконують із вогнетривкого матеріалу, яким може виступати кераміка, графіт або шамот-графіт [8]. Для підвищення термічної стійкості і зменшення термічного стресу тигля використовують системи охолодження водою і контролю за його температурою [9].

Величини температур переходу у рідку фазу марок сталей, які виплавляють в індукційних печах, обумовлюють використання футеровок тиглів трьох видів: (а) кислої, (б) основної і (в) нейтральної. Для кислої (а) футерівки застосовують вогнетриви на основі окису кремнію (90...98 %  $\text{SiO}_2$ ), борної кислоти (1...1,5 %) та невеликої кількості таких окислів металів, як  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ . Тривалість роботи тиглів з кислої футерівки складає 80...100 плавок. Для основної (б) футерівки використовують переважно магнезит (до 85%  $\text{MgO}$ ), рідке скло з домішками окислів типу  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  тощо. Стійкість таких тиглів знижується зі збільшенням об'єму печей і складає 20...50 плавок. Для нейтральної (в) футерівки застосовують матеріали на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з домішками магнезиту. Стійкість такої футерівки є вищою, ніж у двох попередніх варіантах [10].

У джерелі [11] серед переваг індукційних тигельних печей також зазначені широкі можливості їх автоматизації з використанням контролерів та висока екологічність агрегатів, а серед недоліків вказано на проблему низької стійкості футерівки. На думку авторів [7; 12], важливою частиною обслуговування, забезпечення ефективності й надійності обладнання та безпеки процесу плавки є контроль за зношуванням футерівки, який проводять автоматизовано. Отже, аналіз виробничого досвіду з підвищення стійкості футерівки та розроблення рекомендацій для підвищення ефективності контролю зношування футерівки індукційної тигельної плавильної печі є актуальним науково-практичним завданням.

Метою роботи є систематизація методів підвищення стійкості та контролю за станом футерівки індукційних сталеплавильних печей, що сприяє розвитку прогнозування зношування

тиглів та планування ремонтних робіт і витратних матеріалів.

Підвищення стійкості футерівки індукційної сталеплавильної печі є важливим напрямом забезпечення продуктивності та ефективності процесу виробництва сталі визначеної якості. Методологічні основи підвищення стійкості футерівки доволі різноманітні, але загалом можна виділити такі аспекти, що мають вплив на її стійкість:

- вибір матеріалу: важливо вибирати матеріал, який має високу термостійкість, механічну міцність і хімічну стійкість до дії розплавленого металу і шлаку;

- дизайн футерівки: геометрія і конструкція футерівки мають значення для її стійкості; оптимальний дизайн має забезпечити правильний розподіл тепла і матеріалів у футерівці, щоб уникнути перегріву або руйнування;

- оптимізація процесу плавлення: контроль за температурою, швидкістю плавлення, складом шлаку та іншими параметрами процесу допомагає уникнути агресивних умов для футерівки, що можуть призвести до її деградації;

- використання захисних покриттів: сприяє зменшенню впливу на неї агресивних середовищ, забезпечуючи додатковий захист від тепла і корозії;

- регулярне обслуговування та моніторинг: постійне спостереження за станом футерівки, вчасне виявлення пошкоджень або зношення і вчасний ремонт допомагають підтримувати її стійкість на високому рівні.

Підвищення стійкості тигля вимагає комплексного підходу, який включає як вибір відповідних матеріалів, так і правильне управління процесом експлуатації. Процес футерування є доволі складним та супроводжується значним обсягом як ручної, так і механізованої праці. На рис. 2 наведено основні етапи набивки тигля індукційної сталеплавильної печі фірми EGES (Туреччина) ємністю 3 тони в умовах ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод».

Для передбачення стратегій підвищення стійкості футерівки індукційної сталеплавильної печі, забезпечення надійності та продуктивності процесу плавлення в результаті аналізу літературних джерел та практичного досвіду були виділені загальні методи, які використовують у промислових та лабораторних індукційних печах (табл. 1).

Рекомендується ухвалювати рішення після консультування з виробниками або фахівцями з металургійного обладнання.

Регулярний та комплексний контроль за станом футерівки дає змогу вчасно виявляти



а

б

в

г

**Рис. 2. Робота та футерування трьохтонної індукційної печі (виробництва EGES, Туреччина): а – загальний вигляд печі; б – робочий простір печі після випуску металу; в – процес футерування днища печі; г – завантаження машини для футерівки печі в піч краном**

Таблиця 1

**Систематизація методів підвищення стійкості футерівки індукційних сталеплавильних печей**

| № | Метод підвищення стійкості                                       | Сутність методу  |
|---|--|--|
| 1 | 2  | 3  |
| 1 | Вибір відповідного матеріалу тигля                               | Використання високоякісних матеріалів, що мають високу теплостійкість і міцність та відповідають вимогам конкретного процесу. Використання спеціальних матеріалів, таких як карбід кремнію або оксид цирконію, які можуть мати покращену термічну та хімічну стійкість [7; 13].  |
| 2 | Теплоізоляція  | Забезпечення ефективної теплоізоляції футерівки для уникнення тепловтрат, перегріву та зношування в умовах високих температур. Застосовують для концентрування тепла в потрібних областях. Термоізоляційні покриття використовують для зменшення тепловтрат та збереження тепла внутрішньої області тигля. Ці матеріали можуть допомагати утримувати стабільні температурні умови та зменшувати енерговитрати [14].  |
| 3 | Системи охолодження  | Використання систем охолодження для контролю температури футерівки і попередження перегріву [15]. Застосування футерівки з прокладеними каналами для водяного охолодження, прокачування та циркуляція охолоджуючої рідини (води). Введення охолоджуючого середовища (холодного газу) в сам тигель; застосування додаткового активного охолодження (наприклад, Peltier-елементами [16]).  |
| 4 | Моніторинг температурного режиму та автоматизоване керування ним | Встановлення систем моніторингу температур для постійного слідкування за робочими параметрами і вчасного виявлення аномалій задля уникнення різких змін температури, які можуть призвести до термічного шоку тигля. Підтримка стабільного температурного режиму й здійснення плавного нагріву та охолодження. Встановлення термопар та датчиків для постійного моніторингу температури тигля та вчасного реагування на будь-які зміни. Використання автоматичних систем контролю температури, які можуть регулювати подачу охолоджуючої рідини або газу залежно від потреби [17].  |
| 5 | Оптимізація процесів плавлення та конструкції тигля              | Аналіз і оптимізація технологічних процесів для зменшення надмірного гідродинамічного тертя і термічного впливу на футерівку. Дослідження гідродинаміки плавлення для визначення місць, де виникає надмірне тертя. Використання комп'ютерного моделювання для аналізу та вдосконалення гідродинамічних процесів та теплових моделей для визначення розподілу тепла й ідентифікації зон із зайвим тепловим впливом. Внесення змін у форму та конфігурацію футерівки для зменшення опору тертя. Забезпечення правильної конструкції тигля, враховуючи параметри, такі як товщина стінок, форма та розміри. Зменшення ризику термічного шоку шляхом вибору оптимальних параметрів дизайну [18]. |

Закінчення табл. 1

| 1 | 2  | 3  |
|---|--|--|
| 6 | Експертна оцінка, моніторинг зношування і деформацій | Залучення спеціалізованих експертів для систематичної оцінки стану футерівки і виявлення будь-яких ознак або ризиків зношування. Проведення візуальних оглядів для виявлення будь-яких слідів зношення чи деформацій. Використання методів неруйнівного контролю (наприклад, ультразвукового обстеження) для виявлення внутрішніх дефектів [7; 10; 12].  |
| 7 | Регулярне технічне обслуговування та ремонт          | Проведення регулярного технічного обслуговування футерівки для вчасного виявлення ознак зношування, будь-яких дефектів та забезпечення її стійкості. Проведення планових ремонтів, відновлення або заміни тигля [19].  |
| 8 | Застосування захисних покриттів                      | Застосування захисних покриттів, які можуть зменшити вплив хімічних реакцій та зношування на поверхні тигля [20; 21]. Графітові покриття використовуються для захисту тигля від ерозії та окислення за високих температур (графіт є хімічно стійким та витримує високі температури, що робить його ефективним матеріалом для захисту тигля). Керамічні покриття використовуються для створення термічно та хімічно стійкого шару, який захищає тигель від агресивних середовищ (деякі види керамічних покриттів мають високу термічну шоківу стійкість). Оксидно-керамічні матеріали, такі як оксид алюмінію чи оксид цирконію, застосовують для захисту тигля від окислення та агресивних реакцій за високих температур. Деякі виробники пропонують спеціальні покриття, розроблені спеціально для металургійних застосувань та індукційного плавлення. Вони можуть бути оптимізовані для конкретних умов експлуатації. Емалі та керамічні покриття, які мають низький коефіцієнт тертя, можуть використовуватися для зменшення опору тертя та покращення роботи тигля. |
| 9 | Управління електромагнітним полем                    | Оптимізація конструкції та розташування тигля для зменшення впливу електромагнітного поля на його стійкість [22; 23]. Перехід на інноваційні рішення електромагнітного холодного тигля (electromagnetic cold crucible – EMCC) [42–45], тобто використання сегментованого водоохолоджуваного мідного тигля для індукційної плавки у вакуумі або контрольованій атмосфері без застосування вогнетривких матеріалів. EMCC починають використовуватись у двох типах промислових застосувань: як періодичні тиглі для підготовки розплаву, як бездонні циліндричні форми для безперервного лиття. Переваги EMCC: зменшення ефекту тертя в системі формування (мінімізація контакту розплаву з тиглем), тобто значне збільшення стійкості тигля, відсутність забруднень і включень у плавці, створення умов потоку рідини, які можуть контролювати структуру зерна та прискорювати хімічну онлайн-обробку (висока якість відливок), зменшення циклу [23].  |

будь-які зміни в її стані та уникати можливих аварій чи проблем у виробництві.

Показані переваги індукційних сталеплавильних печей, що полягають у кращому перемішуванні шарів рідкого металу в процесі плавки, що дає змогу отримувати більш однорідний метал за хімічним складом. Визначені перспективи використання індукційних печей для виплавки високоякісних сталей та кольорових металів і їх

сплавів. Виконані розвернутий огляд та систематизація методів підвищення стійкості тигля індукційної печі. Отримані результати можуть бути використані на практиці для визначення термінів ремонтів, визначення стратегій подовження спроможності до функціонування тиглів, оцінювання кількості витратних матеріалів для ремонту футерівки індукційних сталеплавильних печей.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Смірнов О.М., Тімошенко С.М., Нарівський А.В. Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні в контексті енергоефективності та європейського зеленого курсу. *Вісник НАН України*. 2023. № 4. С. 21–38.
2. Ren W., Wang L. Precipitation behavior of M23C6 in high nitrogen austenitic heat-resistant steel. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 905.
3. Bedarkar S.S., Singh R. Removal of Phosphorous from Steel Produced by Melting Sponge Iron in Induction Furnace. *Trans. Indian. Inst. Met.* 2013. Vol. 6. P. 207–211.
4. Верховлюк А.М., Русаков П.В., Лахненко В.Л., Петровський Р.В., Червоний І.Ф. Процес одержання вторинних кольорових сплавів з використанням індукційної плавки. *Процеси лиття*. 2019. Т. 134. № 2. С. 40–48.
5. Li H., Wang A., Liu T., Chen P., He A., Li Q., Luan J., Liu C.-T. Design of Fe-based nanocrystalline alloys with superior magnetization and manufacturability. *Materials Today*. 2021. Vol. 42. P. 49–56.

6. Patil D.D., Ghatge D.A. Parametric Evaluation of Melting Practice on Induction Furnace to Improve Efficiency and System Productivity of CI and SGI Foundry – A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. Special Issue 1. P. 159–163.
7. Козлов Г.О., Тополов В.Л. Індукційні печі: навчальний посібник для студентів ВНЗ. Нікополь: НТ НМетАУ, 2008. 32 с.
8. Середенко В.О., Середенко О.В., Паренюк О.А. Виплавка металів та сплавів з високою електропровідністю в індукційних тигельних печах. *Литво. Металургія*. Запоріжжя: АА Тандем. 2019. С. 180–182.
9. Khaydarov A.K., Karimov B.Y. Features of the use of induction crucible furnaces for melting metals. *International Journal of Social Science & Interdisciplinary Research*. 2022. Vol. 11 (03). P. 33–39.
10. Rudnev V., Fett G.A., Griebel A., Tartaglia J. Principles of induction hardening and inspection. *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. ASM International. 2014. Vol. 4.
11. Razzhivin O., Markov O., Subotin O. Automated Melt Temperature Control System in Induction Furnace. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, 2022. P. 1–4.
12. Dötsch, E. Operation of Induction Furnaces in Iron Foundries. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. ASM International. 2014. Vol. 4C.
13. Кущенко П.О., Шулик І.Г., Кущенко К.І., Крахмаль Ю.О., Ткаченко Л.П., Мішньова Ю.Є. Залежність властивостей високоглиноземної зернистої маси та зразків з неї від виду добавки ZrO<sub>2</sub>. *Технологія та застосування вогнетривів і технічної кераміки у промисловості* : тези Міжнародної науково-технічної конференції. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2021. С. 11–12.
14. Dötsch E., Nacke B. Components and Design of Induction Crucible Furnaces. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. ASM International. 2014. Vol. 4C.
15. Umbrasko A., Baake E., Nacke B., Jakovics A. Numerical studies of the melting process in the induction furnace with cold crucible. *COMPEL: The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2008. Vol. 27. No. 2. P. 359–368.
16. Freer R., Powell A.V. Realizing the potential of thermoelectric technology: a Roadmap. *Journal of Materials Chemistry C*. 2020. Vol. 8. P. 441–463.
17. Demin D. Constructing the Parametric Failure Function of the Temperature Control System of Induction Crucible Furnaces. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. Vol. 6. P. 19–32.
18. Przyłucki R., Golak S., Oleksiak B., Blacha L. Influence of the geometry of the arrangement inductor – crucible to the velocity of the transport of mass in the liquid metallic phase mixed inductive. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011. Vol. 11. P. 171–179.
19. Ung D. Enhancing crucible performance in non-ferrous applications. *Foundry Practice*. 2023. Vol. 272. P. 13–17.
20. Prokhorova I.Y., Novikova O.V., Lazarev V.V., Sergeev B.I. A protective coating for the tamped lining of induction furnaces. *Refractories*. 1981. Vol. 22. P. 522–525.
21. Черепова Т.С., Тісов О.В., Кіндрачук М.В., Юрчук А.О., Радіоненко О.В. Триботехнічні властивості порошкового сплаву системи Со-ТіС в умовах високотемпературного фретингу. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 3 (88). С. 99–108.
22. Buliński P., Smolka J., Golak S., Przyłucki R., Palacz M., Siwiec G., Lipart J., Białecki R., Blacha L. Numerical and experimental investigation of heat transfer process in electromagnetically driven flow within a vacuum induction furnace. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 124. P. 1003–1013.
23. Смірнов О.М., Осипенко В.В., Семірягін С.В., Горюк М.С., Семенко А.Ю., Скоробагатько Ю.П. Перемішування металевих розплавів як засіб підвищення ефективності функціонування агрегату «ківш-піч». Новий метод електромагнітного перемішування металевого розплаву в агрегаті «ківш-піч». *Процеси лиття*. 2023. № 2 (152). С. 3–15.

#### REFERENCES:

1. Smirnov O.M., Timoshenko S.M., Narivskiy A.V. (2023). Vidnovlennia ta innovatsiyni rozvytok vyrobnytstva stali v Ukraini v konteksti enerhoefektyvnosti ta yevropeiskoho zelenoho kursu [Restoration and innovative development of steel production in Ukraine in the context of energy efficiency and the European green course]. *Visnyk NAN Ukrainy*. No 4. P. 21–38. [in Ukrainian]
2. Ren W., Wang L. (2022). Precipitation behavior of M23C6 in high nitrogen austenitic heat-resistant steel. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 905.
3. Bedarkar S.S., Singh R. (2013). Removal of Phosphorous from Steel Produced by Melting Sponge Iron in Induction Furnace. *Trans. Indian. Inst. Met.* Vol. 6. P. 207–211.

4. Verkhovliuk A.M., Rusakov P.V., Lakhnenko V.L., Petrovskiy R.V., Chervonyi I.F. (2019). Protses oderzhannia vtorynnykh kolorovykh splaviv z vykorystanniam induktsiinoi plavky. [The process of obtaining secondary non-ferrous alloys using induction melting]. *Protsesy lyttia*. No. 134(2). P. 40–48. [in Ukrainian]
5. Li H., Wang A., Liu T., Chen P., He A., Li Q., Luan J., Liu C.-T. (2021). Design of Fe-based nanocrystalline alloys with superior magnetization and manufacturability. *Materials Today*. Vol. 42. P. 49–56.
6. Patil D.D., Ghatge D.A. (2017). Parametric Evaluation of Melting Practice on Induction Furnace to Improve Efficiency and System Productivity of CI and SGI Foundry – A Review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. Vol. 4. Special Issue 1. P. 159–163.
7. Kozlov H.O., Topolov V.L. (2008). Induktsiini pechi: navchalnyi posibnyk dlia studentiv VNZ [Induction furnaces: a study guide for university students]. Nikopol: NT NMetAU. 32 s. [in Ukrainian]
8. Seredenko V.O., Seredenko O.V., Pareniuk O.A. (2019). Vyplavka metaliv ta splaviv z vysokoju elektroprovodnistiu v induktsiinykh tyhelnykh pechakh [Smelting of metals and alloys with high electrical conductivity in induction crucible furnaces]. *Lytvo. Metalurhiia*. Zaporizhzhia: AA Tandem. P. 180–182. [in Ukrainian]
9. Khaydarov A.K., Karimov B.Y. (2022). Features of the use of induction crucible furnaces for melting metals. *International Journal of Social Science & Interdisciplinary Research*. Vol. 11 (3). P. 33–39.
10. Rudnev V., Fett G.A., Griebel A., Tartaglia J. (2014). Principles of induction hardening and inspection. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. ASM International. Vol. 4.
11. Razzhivin O., Markov O., Subotin O. (2022). Automated Melt Temperature Control System in Induction Furnace. In *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. P. 1–4.
12. Dötsch, E. (2014). Operation of Induction Furnaces in Iron Foundries. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. ASM International. Vol. 4C.
13. Kushchenko P.O., Shulyk I.H., Kushchenko K.I., Krakhmal Yu.O., Tkachenko L.P., Mishnova Yu.Ye. (2021). Zalezhnist vlastyvoitei vysokohlynozernoi zernystoi masy ta zrazkiv z nei vid vydu dobavky ZrO<sub>2</sub> [Dependence of the properties of high-alumina granular mass and samples from it on the type of ZrO<sub>2</sub> additive]. *Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia "Tekhnolohiia ta zastosuvannia vohnetryviv i tekhnichnoi keramiky u promyslovosti": tez. dop.* Kh.: DISA PLLuS. P. 11–12. [in Ukrainian]
14. Dötsch E., Nacke B. (2014). Components and Design of Induction Crucible Furnaces. In: Rudnev V.T., Totten G.E. (eds). *Induction heating and heat treatment, ASM handbook*. ASM International. Vol. 4C.
15. Umbrasko A., Baake E., Nacke B., Jakovics A. (2008). Numerical studies of the melting process in the induction furnace with cold crucible. *COMPEL: The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. Vol. 27. No. 2. P. 359–368.
16. Freer R., Powell A.V. (2020). Realizing the potential of thermoelectric technology: a Roadmap. *Journal of Materials Chemistry C*. Vol. 8. P. 441–463.
17. Demin D. (2020). Constructing the Parametric Failure Function of the Temperature Control System of Induction Crucible Furnaces. *EUREKA: Physics and Engineering*. Vol. 6. P. 19–32.
18. Przyłucki R., Golak S., Oleksiak B., Blacha L. (2011). Influence of the geometry of the arrangement inductor – crucible to the velocity of the transport of mass in the liquid metallic phase mixed inductive. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Vol. 11. P. 171–179.
19. Ung D. (2023). Enhancing crucible performance in non-ferrous applications. *Foundry Practice*. Vol. 272. P. 13–17.
20. Prokhorova I.Y., Novikova O.V., Lazarev V.V., Sergeev B.I. (1981). A protective coating for the tamped lining of induction furnaces. *Refractories*. Vol. 22. P. 522–525.
21. Cherepova T.S., Tisov O.V., Kindrachuk M.V., Yurchuk A.O., Radionenko O.V. (2020). Trybotekhnichni vlastyvoitei poroshkovoho splavu systemy Co-TiC v umovakh vysokotemperaturnoho fretynhu [Tribotechnical properties of the powder alloy of the Co-TiC system under conditions of high-temperature fretting]. *Problemy tertia ta znoshuvannia*. No. 3 (88). P. 99–108. [in Ukrainian]
22. Buliński P., Smolka J., Golak S., Przyłucki R., Palacz M., Siwiec G., Lipart J., Białecki R., Blacha L. (2017). Numerical and experimental investigation of heat transfer process in electromagnetically driven flow within a vacuum induction furnace. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 124. P. 1003–1013.
23. Smirnov O.M., Osypenko V.V., Semiriahin S.V., Horiuk M.S., Semenko A.Yu., Skorobahatko Yu.P. (2023). Peremishuvannia metalevykh rozplaviv yak zasib pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia ahrehatu "kivsh-pich". Novyi metod elektromahnitnoho peremishuvannia metalevoho rozplavu v ahrehati "kivsh-pich" [Mixing of metal melts as a means of increasing the efficiency of the ladle-furnace unit. A new method of electromagnetic mixing of metal melt in the ladle-furnace unit]. *Protsesy lyttia*. No. 2 (152). P. 3–15. [in Ukrainian]

UDC 669.187

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-7>

## NUMERICAL MODELING OF ENERGY EFFICIENT SOLUTIONS OF CARBON REMOVAL AND SLAG MODE IN ELECTRIC ARC FURNACE

**Timoshenko Sergii Mykolaiovych,**

Dr. Sci. (Tech.), Senior Researcher,  
Professor of Electrical Engineering Department  
Donetsk National Technical University  
ORCID ID: 0000-0003-4221-9978

*In the framework of modern two-stage liquid steel production, electric arc furnace (EAF) is a unit for intensive smelting of intermediate product, with subsequent finishing to specified steel grade by methods of the ladle metallurgy. The EAF technological regulations provide for obtaining a low-carbon melt in the energy-saving mode of slag foamed with gas bubbles. Reduction of the shape factor of steel melting bath (diameter to depth ratio) with an unchanged liquid steel capacity is aimed at increasing the energy efficiency of the EAF due to reduction of heat losses by radiation of the melt surface on the working space water-cooled panels. The transition to a "deep" bath also contributes to the intensification of heat and mass exchange processes under the conditions of forced mixing of the melt, in particular, purging with inert gas. The effect of a "deep" bath on the process of carbon removal on argon and CO bubbles and formation of foamed slag during intensive technology, from the standpoint of the EAF energy efficiency, a numerical study was carried out. The single bubble model and known empirical relations for mass transfer coefficients of reactants under the conditions of diffusion stoichiometry are used. For industrial 120-tons EAF it is shown that reducing the bath shape factor to the optimum, according to the energy efficiency criterion, leads to an increase in the rate of metal decarburization by 5–18% due to the intensification of the mass transfer processes of reagents in the system of iron-carbon melt-floating gas bubble. On the base of known experimental data, under conditions of optimal surface tension and viscosity of the slag, a regression equation was obtained for the height of stable slag foam on process gas flow rate through metal-slag interface. Using a numerical model of radiation heat transfer, it is shown that a "deep" bath factor, in this context, contributes to the reduction of radiation heat losses with water by 4% due to more effective shielding of electric arc radiation on water-cooled EAF panels with foamed slag.*

**Key words:** electric arc steel melting furnace, "deep" bath, purging with inert gas, intensification of decarburization on gas bubbles, foamy slag, energy efficiency.

**Тимошенко Сергій. Чисельне моделювання енергоефективних рішень зневуглецевлення й шлакового режиму в дуговій сталеплавильній печі**

В рамках сучасного двостадійного виробництва рідкої сталі електродугова піч (ДСП) є установкою для інтенсивної виплавки напівфабрикату з подальшим доведенням сталі до заданої марки методами ковшової металургії. Технологічний регламент ДСП передбачає отримання низьковуглецевого розплаву в енергозберігаючому режимі спіненого газовими бульбашками шлаку. Зменшення коефіцієнта форми сталеплавильної ванни (відношення діаметру до глибини) за незмінної місткості рідкої сталі спрямовано на підвищення енергоефективності ДСП через зниження теплових втрат випромінюванням поверхні розплаву на водоохолоджувальні панелі робочого простору. Перехід до «глибокої» ванни сприяє інтенсифікації процесів тепломасообміну в умовах примусового перемішування розплаву, зокрема, інертним газом. Шляхом чисельного моделювання досліджено, що з позицій енергоефективності ДСП вплив «глибокої» ванни на процес зневуглецевлення сталі на бульбашках аргону й СО і утворення спіненого шлаку за інтенсивної технології. Застосовано модель одиночної бульбашки і відомі емпіричні співвідношення для коефіцієнтів масопереносу реагентів за умов дифузійної стехіометрії. Щодо промислової 120-т ДСП показано, що зменшення коефіцієнта форми ванни до оптимального за критерієм енергоефективності приводить до збільшення швидкості зневуглецевлення металу на 5–18% за рахунок інтенсифікації процесів масопереносу реагентів в системі «залізовуглецевистий розплав – спливаюча газова бульбашка». На основі відомих експериментальних даних, за умов оптимального поверхневого натягу та в'язкості шлаку, отримано рівняння регресії для висоти стійкої шлакової піни від швидкості потоку технологічного газу через межу «метал – шлак». За допомогою чисельної моделі радіаційного теплообміну показано, що фактор «глибокої» ванни в цьому контексті сприяє зменшенню радіаційних втрат теплоти з водою на 4% за рахунок більш ефективного екранування спіненим шлаком випромінювання електричної дуги на водоохолоджувальні панелі ДСП.

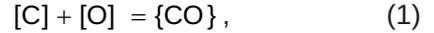
**Ключові слова:** дугова сталеплавильна піч, «глибока» ванна, продувка інертним газом, зневуглецевлення сталі на газових бульбашках, спінений шлак, енергоефективність.

**Introduction: state of the art and the research task.** The EU Green Deal policy in relation to steel production, against the background of changing consumer demands, will give preferences in the nearest future to energy-efficient and environmentally friendly solutions of hydrogen reduction of iron and electrical steelmaking technologies, particularly, in arc furnaces (EAF) [1]. A technological sketch of modern EAF, in the context of improvement efficiency of carbon removal from the steel and energy saving slag mode, is shown in Fig. 1.

A shape factor of steelmaking bath  $k_b = D_b/H_b$  (Fig. 1, a) in the classical EAF technology constitutes 4.5–5.5 [2]. Such geometry provides a developed metal-slag interfacial surface, which is necessary for effective steel refining. In a modern EAF technologies with subsequent finishing of the steel to specified grade by methods of ladle metallurgy, cooling panels in the workspace, forced mixing of the bath, to increase the energy efficiency seems rational the transition to a “deep” bath with a smaller radiating surface due to reduction of  $k_b$  [2]. An important advantage of a “deep” bath is the intensification of heat and mass exchange processes under conditions of forced mixing [3]. This factor contributes to reduction of the technological period and time of the heat in

general, and ultimately – the energy efficiency of the furnace.

A widely investigated reaction between carbon [C] and oxygen [O], dissolved in the molten steel:

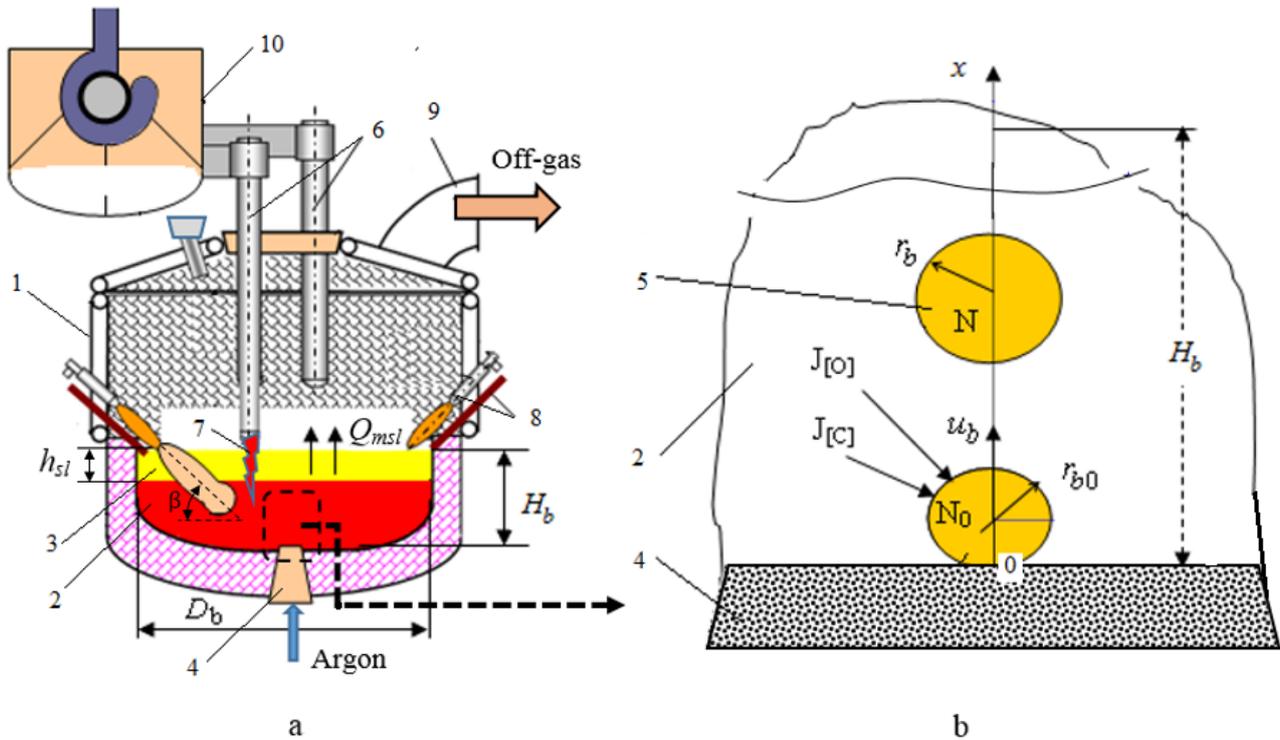


associated with the emerging of gas phase. In a homogeneous melt such reaction is complicated through high value of capillary pressure to form a bubble. Therefore, it flows in the bath mainly on free surfaces, in particular gas bubbles. Chemical composition of the bubbles in the EAF liquid bath conditions is mainly represented by CO, that is the ultimate product of dissolved and injected carbon oxidation through supersonic oxygen lance operation, and argon, which is used during pneumatic mixing. The reaction constant of (1) has the following temperature dependence [5]:

$$k_{co} = p_{co} / [C]_s [O]_s = 10^{(1860/T_m)+1.61}, \quad (2)$$

where  $p_{co}$  – the partial pressure of CO in the bubble (at);  $[C]_s, [O]_s$  – surface concentrations of carbon and oxygen at the bubble-melt boundary (wt. %);  $T_m$  – metal temperature (K).

The kinetics of metal decarburization due to the reaction (1) on emerging gas bubbles for one-dimensional problem is described by the next differential equation [6]:



**Fig. 1. Technological scheme of EAF (a). Mechanism of decarburization process on floating gas bubbles (b). 1 – EAF, 2 – metal bath, 3 –slag bath, 4 – porous plug, 5 – gas bubble, 6 – electrode, 7 – electric arc, 8 – heat intensification facilities, 9 – aspiration duct, 10 – charging bucket (other designation are in the text)**

$$dn / dx = J_{C,O} \cdot F_b / u_b, \quad (3)$$

where  $n$  – current by coordinate  $x$  (m), amount of CO in the bubble (kmol);  $F_b$  – bubble surface area (m<sup>2</sup>);  $u_b$  – velocity of bubble ascent (m/s);  $J_{C,O}$  – flow of reagents from the melt into the bubble [kmol/(m<sup>2</sup>·s)].

A task of research is to substantiate optimization of the EAF bath form factor, in the context of importance to assess the possibility of intensification the technology-regulated process of carbon removal from steel on gas bubbles with an increase in the depth of steelmaking bath.

#### Main content: method, results, discussion.

The task was completed by numerical simulation in the Mathcad application package.

The ascent of a single inert gas bubble with initial radius  $r_{b0}$  in iron-carbon melt in the gravitation field (Fig. 1, b) is considered. Reaction (1) takes place on the bubble surface until equilibrium established with the gas phase in the bubble and surface concentration of carbon and oxygen in the melt, that described by equation (2). In order to correct calculation of equation (2), surface concentrations should be expressed in terms of their volume concentrations, which can be practically determined.

According to reaction (1), diffusion stoichiometry carbon  $j_{[C]}$  and oxygen  $j_{[O]}$  flows is observed during formation of CO, which gives the expression of Fick's law for a one-dimensional problem the following form [kmol/(m<sup>2</sup>·s)]:

$$j_{[C]} = \beta_{[C]}([C] - [C]_s)f_c = j_{[O]} = \beta_{[O]}([O] - [O]_s)f_o = j, \quad (4)$$

where  $f_c = 5,83$ ;  $f_o = 4,38$  – coefficients of conversion reactant concentrations [C], [O] with wt. % in kmol/m<sup>3</sup>.

The values of the mass transfer coefficients of oxygen and carbon  $\beta_{[O]}, \beta_{[C]}$  (m/s) in the iron-carbon melt-floating bubble system are determined by the following empirical expressions [6]:

$$\beta_{[C]} = a \sqrt{D_{[C]} \cdot u_b / r_b}, \quad \beta_{[O]} = a \sqrt{D_{[O]} \cdot u_b / r_b}, \quad (5); (6)$$

where  $u_b$  – ascending bubble velocity in the melt bath (m/s);  $D_{[O]}, D_{[C]}$  – molecular diffusion coefficients of oxygen and carbon in molten steel (m<sup>2</sup>/s);  $r_b$  – fluent bubble radius (m);  $a$  – empirical coefficient equal 0,88 for spherical bubble [6].

Expressing one surface concentration from equation (2) in terms of another one, we get the next form:

$$[O]_s = p_{co} / ([C]_s k_{co}). \quad (7)$$

Let's determine the surface concentration of oxygen from equation (7), taking into account expression (4):

$$[O]_s = [O] - (j / \beta_{[O]}) = p_{co} / ([C]_s k_{co}). \quad (8)$$

Let's transform equation (7) to find the surface concentration of carbon.

$$[C]_s = p_{co} / [k_{co} \cdot ([O] - j / \beta_{[O]})]. \quad (9)$$

Substituting the value of surface concentration of carbon from expression (9) into equation (8), we get the stoichiometric reagents flux in kmol/(m<sup>2</sup>·s):

$$j = \beta_{[C]}([C]f_c - p_{co} / [k_{co}([O]f_o - j / \beta_{[O]})]) = \\ = \beta_{[O]}[C]f_c - \beta_{[C]}p_{co} / [k_{co}([O]f_o - j / \beta_{[O]})].$$

Let's transform this equation, reducing it to a square one, and find its roots:

$$j_{1,2} = 0,5 [(\beta_{[O]}[O]f_o + \beta_{[C]}[C]f_c) \pm \\ \pm \left[ (\beta_{[O]}[O]f_o + \beta_{[C]}[C]f_c)^2 - 4\beta_{[O]}\beta_{[C]} \left( [C][O]f_c f_o - \frac{p_{co}}{k_{co}} \right) \right]^{0,5}]. \quad (10)$$

The expression  $\theta = [C][O] - p_{co} / k_{co}$  in the equation (10) is a driving force of the reaction (1). When the value of  $\theta > 0$ , diffusion flow of the reagents proceeds from the melt to the bubble; at  $\theta < 0$  process take place in the direction from the bubble to the melt. When choosing the root of equation (10), we are guided by the reasoning that in the absence of the driving force of the reaction (1), that is at  $\theta = 0$ , the flow of reactants approaches zero. Therefore, the actual solution of equation (10) has a (-) sign.

The differential equation (3) for a single bubble of argon and CO, taking into account the expressions for the input parameters, solved numerically per conditions of technological (heating) period in 120-ton EAF, operating with intensive technology. There are: [C] = 0.22%, [O] = 0.01%, temperature of the bath and in the bubble is  $T_m = 1873$  K, diffusion coefficients  $D_{[C]} = 7.9 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s,  $D_{[O]} = 7.5 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s [6]. The depth of the bath and the initial radius of the bubble varied from 1 to 2 m and from 10 to 40 mm, respectively.

In the process of solution, the parameters that are a function of bubble position on the bath height were adjusted according to  $x$  coordinate (Fig. 1, b):

- bubble fluent radius
- $r_b = [(N_o + N)R_g T_m / [p_{at} + (H_b - x) / H_g] \cdot 1,33\pi]^{0,33}$  (m);
- fluent pressure in the bubble
- $p = p_{at} + [(H_b - x) / H_g]$  (at);
- velocity of ascent the bubble in steel bath
- $u_b = 1,02 \sqrt{g r_b}$  (m/s) [7];
- mass transfer coefficients according to formulas (5,6) through  $u_b, r_b$  (m/s),

where  $N, N_o$  is the amount of gas in the bubble at the exit from the bath and in initial bubble,

respectively (kmol),  $R_g$  – universal gas constant [J/(kmol·K)],  $g$  – gravity constant ( $m/s^2$ ),  $H_g = 1.48$  – hydrostatic height of liquid steel (m),  $p_{at}$  – normal atmospheric pressure (at).

The dependences of relative progress of decarburization reaction on CO and argon bubbles  $\alpha_{dec} = (N/N_0)/(N/N_0)^*$  in the "deep" bath ( $N/N_0$ ) at  $H_b = 1.75$  m and initial basic bath ( $N/N_0$ )\* at  $H_b = 1.1$  m versus the initial size of the gas bubble are shown in Fig. 2.

Analyzing the results, it can be seen that with average bubble sizes of 10–20 mm typical for a steel-melting bath [7], increasing the depth of 120-ton EAF bath from 1.10 to 1.75 m allows to count on an increase in the decarburization rate by 5–18% due to the intensification of mass transfer reagents in the melt-bubble system.

A higher result of decarburization on argon bubbles, in comparison with CO bubbles, appears to be regular, when concentrations of carbon and oxygen in the bath are close to equilibrium.

It should be noted that the results, obtained for a single bubble, with mass bubbling will be lower through mutual influence, but the general trend of mass transfer intensification in a "deep" bath will obviously remain.

Carbon removal is accompanied by intensification of melting in the EAF due to powerful mixing of the bath both with oxygen lance jets and with CO bubbles. Increasing the intensity of oxygen blowing the bath through heat intensification facilities (Fig. 1, a) is limited by the possibility of damage to the furnace lining by a high-temperature reaction

crater. According to research by P. McGee and G. Irons [8], the penetration depth of a supersonic inclined oxygen jet into a liquid steel bath is proportional to the square of the blowing rate. According to M. Alam, G. Irons, G. Brooks and others [9] the dependence between these parameters is close to linear. Increasing the depth of 120-t EAF bath by  $\approx 1.6$  times (from 1.1 to 1.75 m) gives the reason to increase the average blowing intensity by  $\approx 2$  times. Such a change in the regime of oxygen blowing will have a positive effect both on the dynamics of bath homogenization with the increase in number and depth of gas bubbles emergence in the secondary reaction zone [5], and on the mass transfer processes on the crater walls and on the bubbles during metal decarburization [10; 11].

A decrease in  $k_b$  relative to the base value leads to the need to shift the oxygen jets from the electrodes by increasing of inclination angle  $\beta$  of oxygen lance axis to the horizon (Fig. 1, a). This operation, according to [9], should give a positive effect due to the reduction of the melt splashing and associated negative effects of water-cooled panels metallization and iron losses.

Among the parameters that determine a mode of slag foaming, in addition to basicity, oxidation degree (content of FeO), surface tension and viscosity of the slag, an important is the specific, per unit area of the bath, intensity of CO gas emission at the metal-slag interface  $Q_{msl}$  [ $m^3/(m^2 \cdot s)$ ]. This factor, assuming its uniform distribution over the bath surface, determines a gas dynamic of the

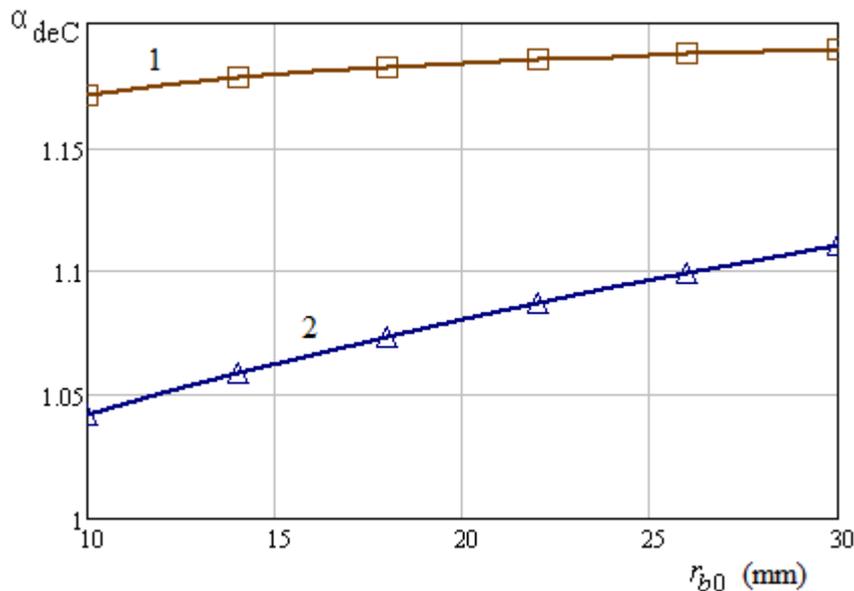
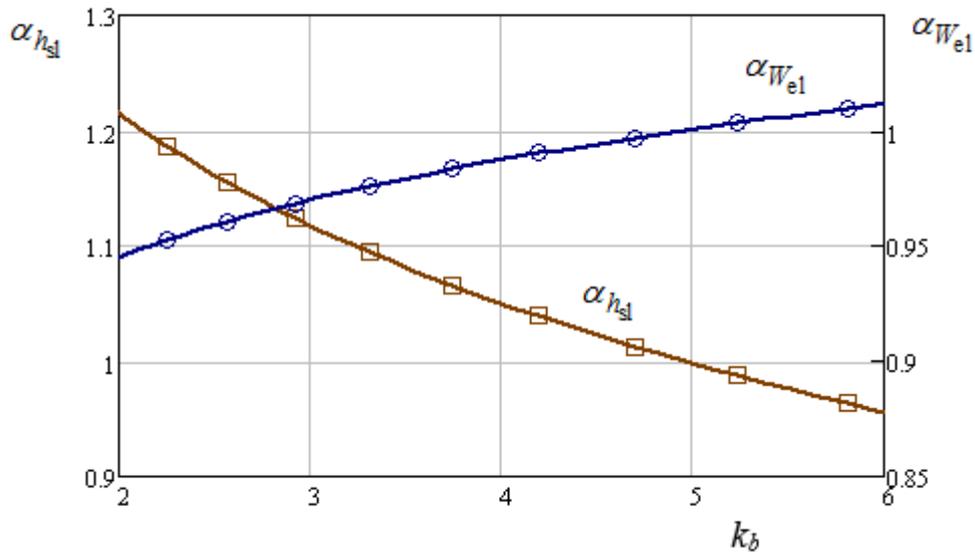


Fig. 3. Relative foaming slag height  $\alpha_{hel}$  and relative energy consumption  $\alpha_{wel}$  versus bath form factor  $k_b$  for industrial 120-ton EAF



**Fig. 2. Progress of carbon removal reaction  $\alpha_{dec}$  as a result of transition from base bath to “deep” one versus initial bubble radius  $r_{b0}$ ; 1 – argon, 2 – CO**

slag and, thereby, the height and stability of the slag foam [12; 13].

Based on the analysis of experimental data by S. Aminorroaya, H. Edris [13] on 200-t EAF for the height of foamed slag  $h_{sl}$  (mm) depending on  $Q_{msl}$  and the specific consumption of electricity  $W_{el}$  (kWh/t) depending on  $h_{sl}$ , with the content in the slag (FeO) = 25–30%, the following trend line equations are obtained:

$$h_{sl} = 213,30 \ln(Q_{msl}) - 50,26. \quad (11)$$

$$W_{el} = -0,26 h_{sl} + 789,5. \quad (12)$$

The evaluation of  $Q_{msl}$  was carried out with the same mode of heat intensification facilities operation with a specific oxygen consumption of 45 m<sup>3</sup>/ton during 15 minutes, blowing, typical for intensive EAF technology. Dependencies (11,12) are used to estimate energy savings when applying the foamed slag regime under the conditions of implementing a “deep” bath in 120-t EAF.

The EAF energy efficiency indicators are presented in dimensionless form (Fig. 3): the relative increase in the height of the foamed slag  $\alpha_{h_{sl}}$  and the relative energy savings  $\alpha_{W_{el}}$  through transition from the basic bath ( $H_b = 1.10$  m,  $k_b = 5.0$ ) to the “deep” one ( $H_b = 1.75$  m,  $k_b = 2.5$ ). The parameter  $\alpha_{W_{el}}$  is obtained, basing on a mathematical model of heat exchange by radiation in the EAF

[14]. It is characterized by a relative decrease of radiation energy losses in water-cooled panels due to screening effect of increased height of the foamed slag.

Based on shown in Fig. 3 estimates of relative values  $\alpha_{h_{sl}}$  and  $\alpha_{W_{el}}$  it can be predicted that transition from the base bath to the “deep” one, with corresponding decrease in  $k_b = D_b / H_b$  from 5.0 to 2.5, the relative height of the foaming slag increases by 15%, which ensures the energy savings in the furnace by  $\approx 4\%$ .

**Conclusion.** On the basis of numerical modeling of the mass transfer processes in the EAF, it was established that reducing the form factor of steelmaking bath from traditional 5.0 to 2.5, according to the energy efficiency criterion, leads to an increase in metal decarburization rate by 5–18% due to the intensification of the mass transfer processes on ascending gas bubbles. The advantage of the “deep” bath regarding to the slag mode is to increase of allowable, under the conditions of reaction crater action on refractory, intensity of oxygen blowing by  $\approx 2$  times. Another positive factor is the reduction of radiation heat losses with water in the protective panels by  $\approx 4\%$  due to more effective shielding of the arcs with foamed slag. Obtained data should be considered as a further argument in favor of a “deep” bath EAF concept.

#### LITERATURE:

1. A European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent. 2019. URL: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en).
2. Toulouevski Yu., Zinurov I. *Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection*. Berlin: Springer-Verlag. 2010. 258 p.

3. Timoshenko S.N. (2012). Improving of bath geometry – the way to increase of the EAF thermal efficiency. *Scientific papers DonNTU. Series Metallurgy*. 2012. P. 36–43.
4. Timoshenko S.N., Stovpchenko A.P., Kostetski Yu.N. Gubinski M.V. Energy efficient solutions for EAF steelmaking. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2018. № 88. P. 18–24.
5. Ghosh A., Chatterjee, A. *Ironmaking and Steelmaking Theory and Practice*; PHI Learning Private Limited: Delhi, India. 2015. 494 p.
6. Papamantellos D., Lange K., Okohira K., Schenk H. A Mathematical approach for the mass transfer between liquid steel and an ascending bubble. *Metallurgical Transactions*. 1971. Vol. 2. P. 3135–3144.
7. Mazumdar D., Guthrie R. The Physical and Mathematical Modeling of Gas Stirred Ladle Systems. *ISIJ International*. 1995. Vol. 35. P. 1–20.
8. McGee P., Irons G. The penetration of oxygen lance jets in foaming slags. *Iron and Steelmaker*. 2002. Vol. 29. P. 59–68.
9. Alam M., Irons G., Brooks G., Fontana A., Naser J. Inclined Jetting and Splashing in Electric Arc Furnace Steelmaking. *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. P. 1439–1447.
10. Memoli F., Mapelli C., Ravanelli P., Corbella M. Simulation of Oxygen Penetration and Decarburisation in EAF Using Supersonic Injection System. *ISIJ International*. 2004. Vol. 44. P. 1342–1349.
11. He C., Zhu R., Dong K., Qiu Y., Sun K., Jiang G. Three-phase numerical simulation of oxygen penetration and decarburization in EAF using injection system. *Ironmaking & Steelmaking*. 2011. Vol. 38. P. 291–296.
12. Zhu T., Coley K., Irons G. Progress in Slag Foaming in Metallurgical Processes. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2012. Vol. 43B. P. 751–757.
13. Aminorroaya S., Edris H. The effect of foamy slag in electric arc furnaces on electric energy consumption. *7th European Electric Steelmaking Conference (Venice, 26–29 May 2002)*. Vol. 2. P. 447–456.
14. Timoshenko S.N. Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace. *System Technologies*. 2016. № 3. P. 33–39.

#### REFERENCES:

1. A European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent (2019). [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en).
2. Toulouevski, Yu., Zinurov, I. (2010) *Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection*. Berlin: Springer-Verlag, 258 p.
3. Timoshenko, S.N. (2012). Improving of bath geometry – the way to increase of the EAF thermal efficiency. *Scientific papers DonNTU. Series Metallurgy*. Donetsk: DonNTU, 36–43.
4. Timoshenko, S.N., Stovpchenko, A.P., Kostetski, Yu.N. Gubinski, M.V. (2018). Energy efficient solutions for EAF steelmaking. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 88, 1, 18–24.
5. Ghosh, A., Chatterjee, A. (2015). *Ironmaking and Steelmaking Theory and Practice*; PHI Learning Private Limited: Delhi, India, 494 p.
6. Papamantellos, D. Lange, K., Okohira, K., Schenk, H. (1971). A Mathematical approach for the mass transfer between liquid steel and an ascending bubble. *Metallurgical Transactions*, vol. 2, 3135–3144.
7. Mazumdar, D., Guthrie, R. (1995). The Physical and Mathematical Modeling of Gas Stirred Ladle Systems. *ISIJ International*, vol. 35, 1–20.
8. McGee, P., Irons, G. (2002). The penetration of oxygen lance jets in foaming slags. *Iron and Steelmaker*, vol. 29, 59–68.
9. Alam, M., Irons, G., Brooks, G., Fontana, A., Naser, J. (2011). Inclined Jetting and Splashing in Electric Arc Furnace Steelmaking. *ISIJ International*, vol. 51, 1439–1447.
10. Memoli, F., Mapelli, C., Ravanelli, P., Corbella, M. (2004). Simulation of Oxygen Penetration and Decarburization in EAF Using Supersonic Injection System. *ISIJ International*, vol. 44, 1342–1349.
11. He, C., Zhu, R., Dong, K., Qiu, Y., Sun, K., Jiang, G. (2011). Three-phase numerical simulation of oxygen penetration and decarburisation in EAF using injection system. *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 38, 291–296.
12. Zhu, T., Coley, K., Irons, G. (2012). Progress in Slag Foaming in Metallurgical Processes. *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 43B, 751–757.
13. Aminorroaya, S., Edris, H. (2002). The effect of foamy slag in electric arc furnaces on electric energy consumption. *7th European Electric Steelmaking Conference (Venice, 26–29 May 2002)*, vol. 2, 447–456.
14. Timoshenko, S.N. (2016). Computer modeling bath geometry to improve energy efficiency of electric arc furnace. *System Technologies*, 3, 33–39.

## АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 004.021:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-8>

### ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРАЛЬНОЮ МАШИНОЮ З УРАХУВАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК» (ЧАСТИНА ПЕРША)

**Бублік Андрій Вікторович,**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0000-0003-3015-6754

**Гурбанов Руслан Аламдарович,**

аспірант групи 174А-23-10  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0009-0002-4606-7107

**Рибачук Ілля Сергійович,**

здобувач групи 151М-21-1  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Наразі технології «розумного будинку» є дуже затребуваними у світі та, зокрема, в Україні. Їх впровадження дозволяє зменшити споживання ресурсів будинком, підвищити безпеку та комфортність перебування у приміщеннях. Тому усі дослідження, що пропонують нові рішення за напрямом технологій «розумного будинку» є затребуваними й актуальними. Показані недоліки використання класичного ПІД-регулятора для нагрівання води у пральній машині з позиції вирішення задачі розподілу потужності між побутовими приладами. З урахуванням цього запропонований алгоритм адаптивного автоматичного керування процесом нагрівання води в пральній машині, що базується на ідентифікації динамічних властивостей об'єкта керування. Результати ідентифікації використовуються як для прогнозування кількості споживаної електроенергії пральною машиною, так і для синтезу оптимального за швидкодією регулятора для керування нагріванням води. Результатами дослідження є встановлені нові закономірності процесу керування температурою води у пральній машині, які дозволили запропонувати інноваційний підхід щодо синтезу системи автоматичного керування з урахуванням концепції «розумний будинок». Встановлено, що ідентифікацію динамічної моделі нагрівання води в пральній машині при роботі системи керування з прийнятною точністю можна проводити за половиною експериментальної кривої розгону – до точки її перегину. Фактично довжина експериментальної кривої розгону до точки її перегину є оптимальною для проведення процедури ідентифікації моделі об'єкта керування за критеріями тривалості етапу формування кривої (продуктивність системи керування) та точності визначення параметрів моделі (точність відпрацювання системою зміни уставки). Встановлено, що зі збільшенням амплітуди тестового керуючого сигналу при формуванні експериментальної кривої розгону збільшується похибка при розрахуванні інтервалів перемикання оптимального за швидкодією регулятора, через що збільшується статична похибка на момент закінчення нагрівання води (закінчення другого інтервалу перемикання регулятора). Проведена перевірка ефективності запропонованого алгоритму керування на основі розробленої імітаційної моделі системи автоматичного керування температурою води у пральній машині.

**Ключові слова:** синтез системи автоматичного керування, імітаційна модель, температура води в барабані, пральна машина.

**Bublikov Andrii, Gurbanov Ruslan, Rybachuk Illia. Features of the washing machine automatic control process taking into account the smart home concept**

Currently, "smart home" technologies are in great demand in the world and, in particular, in Ukraine. Their implementation makes it possible to reduce the consumption of resources by the house, increase the safety and comfort of staying in the premises. Therefore, all research that offers new solutions in the direction of "smart home" technologies is in demand and relevant. Disadvantages of using a classic PID regulator for heating water in a washing machine are shown from the point of view of solving the problem of power distribution between household

appliances. Taking this into account, an algorithm for adaptive automatic control of the water heating process in the washing machine is proposed, based on the identification of the dynamic properties of the control object. The results of the identification are used both for forecasting the amount of electricity consumed by the washing machine and for the synthesis of the speed-optimized regulator for controlling water heating. The results of the study established new regularities of the water temperature control process in the washing machine, which made it possible to propose an innovative approach to the synthesis of an automatic control system taking into account the concept of "smart house". It was established that identification of the dynamic model of water heating in the washing machine during operation of the control system with acceptable accuracy can be carried out by half of the experimental acceleration curve – up to the point of its inflection. In fact, the length of the experimental acceleration curve to the point of its inflection is optimal for carrying out the procedure for identifying the model of the control object based on the criteria of the duration of the curve formation stage (performance of the control system) and the accuracy of determining the parameters of the model (accuracy of working out the setpoint change system). It was established that with an increase in the amplitude of the test control signal during the formation of the experimental acceleration curve, the error in calculating the switching intervals of the optimal regulator in terms of speed increases, due to which the static error at the end of the water heating (end of the second switching interval of the regulator) increases. The effectiveness of the proposed control algorithm was verified on the basis of the developed simulation model of the automatic water temperature control system in the washing machine.

**Key words:** synthesis of the automatic control system, simulation model, water temperature in the drum, washing machine.

**Вступ.** Наразі технології «розумного будинку» є дуже затребуваними у світі та, зокрема, в Україні [1]. Їх впровадження дозволяє зменшити споживання ресурсів будинком, підвищити безпеку та комфортність перебування у приміщеннях. Тому усі дослідження, що пропонують нові рішення за напрямом технологій «розумного будинку» є затребуваними й актуальними.

Одним з напрямів впровадження технологій «розумного будинку» є інтелектуалізація побутових приладів з метою економії споживання ресурсів, підвищення комфортності користування ними. При цьому йдеться не тільки про використання технологій інтернет-речей, завдяки чому створюється технічна база для впровадження складних сценаріїв інтелектуальної сумісної роботи приладів, а й про надання системам керування приладами властивостей кіберфізичних систем, коли в алгоритм прийняття керуючих рішень закладається цифрова проекція реальних фізичних процесів, їх «розуміння» системою [2].

Процеси нагрівання води та опалення є найбільш енерговитратними в будинках. І якщо здійснювати одну з головних функцій системи енергетичного менеджменту, що стосується розподілу електроенергії між споживачами, то побутові прилади, де мають місце ці енерговитратні фізичні процеси, мають бути адаптовані під сумісну роботу з системою енергетичного менеджменту, що є одною з систем розумного будинку [3].

Саме це завдання вирішується в даній роботі – відбувається модифікація системи автоматичного керування нагріванням води у пральній машині через надання їй властивостей кіберфізичної системи з метою інтелектуалізації пральної машини та її адаптації

для сумісної роботи з системою енергетичного менеджменту в будинку.

При цьому поставлено за мету визначити закономірності процесу нагрівання води, що дозволять адаптувати процес автоматичного керування температурою води під сумісну роботу з системою енергетичного менеджменту в будинку.

Для досягнення поставленої мети сформовані і вирішені такі наукові задачі:

- створена імітаційна модель системи автоматичного керування температурою води у барабані пральної машини;

- проведено дослідження ефективності та доцільності використання для автоматичного керування температурою води у барабані пральної машини ПІД-регулятора в умовах обмеженого енергоресурсу;

- запропонований новий метод синтезу кіберфізичної системи автоматичного керування температурою води у барабані пральної машини на основі розбиття процесу нагрівання води на два етапи, коли на першому етапі відбувається визначення цифрової проекції фізичного процесу, а на другому – відпрацювання уставки регулятором, що розрахований на базі моделі фізичного процесу нагрівання води з урахуванням обмеження за потужністю ;

- проведені дослідження режимів роботи синтезованої кіберфізичної системи керування температурою води у барабані пральної машини, що дозволили встановити оптимальні параметри алгоритму керування.

**Матеріали та метод.** Для дослідження системи автоматичного керування температурою води у барабані пральної машини використані методи теорії автоматичного керування. Дослідження проведені на основі

обчислювальних експериментів з використанням комп'ютеризованих методів ідентифікації та синтезу систем автоматичного керування [4].

За основу взяті експериментальні дані, отримані в реальних умовах для промислової пральної машини. За підсумками обробки експериментальних даних отримана модель процесу нагрівання води в пральній машині як об'єкта керування (рис. 1).

Таким чином, за результатами обробки експериментальних даних маємо досить простий за своїми статичними й динамічними властивостями об'єкт автоматичного керування другого порядку з від'ємними дійсними коренями характеристичного рівняння з лінійною статичною характеристикою та без транспортного запізнення.

Отже, за аналізом властивостей об'єкта автоматичного керування можна зробити висновок, що за умови синтезу системи автоматичного керування при реалізації функції нагрівання води з заданими критеріями якості перехідного процесу підійде класичний ПІД-регулятор, але в якому відпрацьоване обмеження щодо вихідного керуючого сигналу з забезпеченням функції захисту від перенасичення інтегральної складової регулятора.

Модель системи автоматичного керування створена з розрахунку прийняття за основу при синтезі системи керування принципу керування за зворотним від'ємним зв'язком. У такому разі структурна схема системи автоматичного керування температурою води у пральній машині буде виглядати так, як на рис. 2.

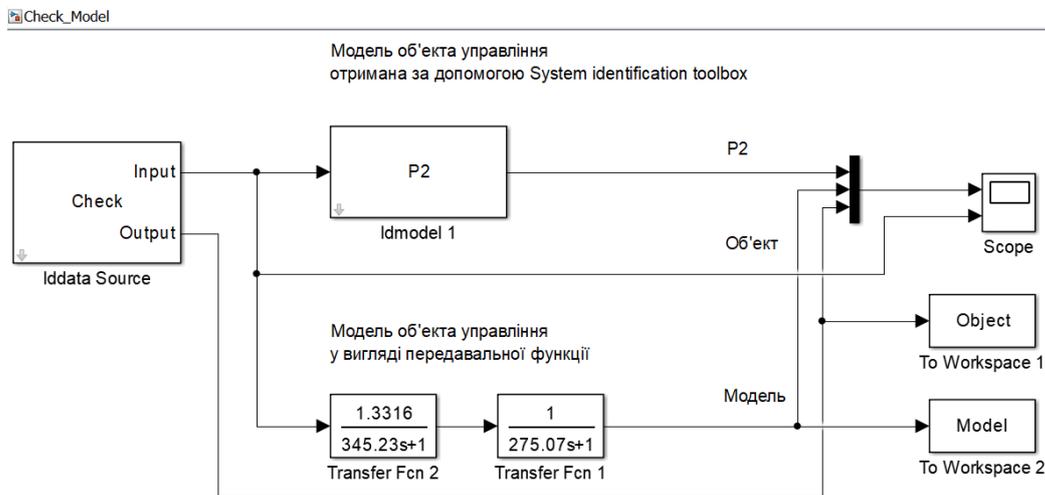


Рис. 1. Модель об'єкту управління в середовищі Simulink

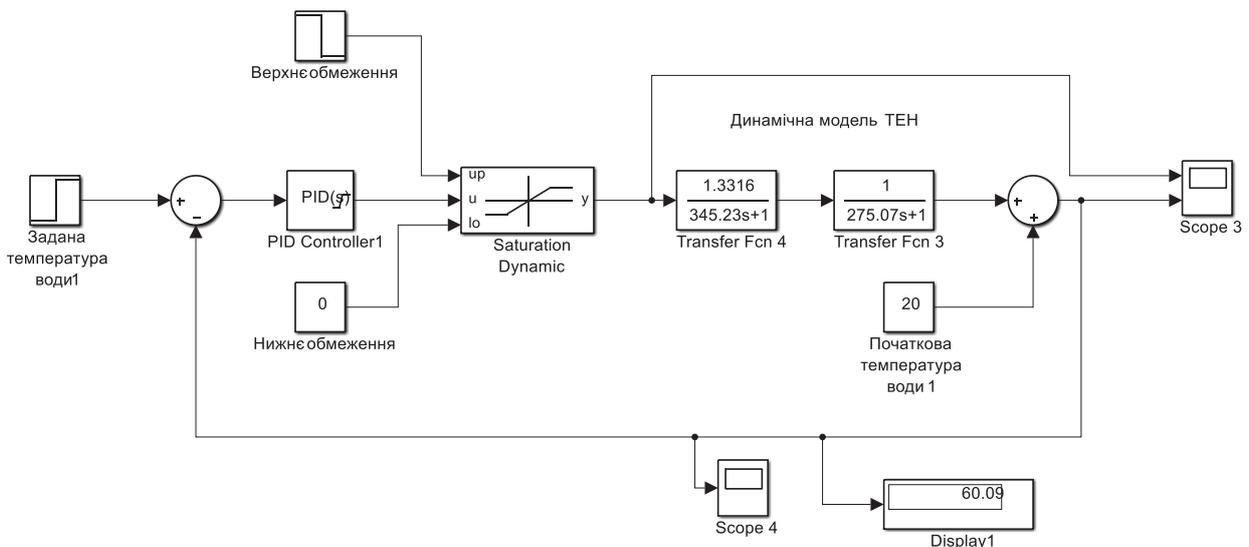


Рис. 2. Структурна схема динамічної моделі системи автоматичного керування температурою води у пральній машині

В модель на рис. 2 введений блок, який динамічно змінює обмеження щодо керуючого сигналу на виході ПІД-регулятора для імітування зміни виділеної потужності для пральної машини системою енергетичного менеджменту. Справа в тому, що ставиться за мету синтез не простої системи автоматичного керування, а тієї, яка має ознаки кіберфізичної системи. Оскільки кіберфізична система автоматичного керування температурою води у пральній машині має додаткову функцію забезпечення коректного нагрівання води в умовах обмеженого енергоресурсу, регулятор повинен якісно працювати завдання саме в цих умовах, коли потужність ТЕН може в будь який момент зменшитись. Це зумовлено тим, що інтелектуальна система енергетичного менеджменту в будинку формує тактику розподілу потужності, що зберігається незмінною певний час, доки суттєво не зміняться умови енергоспоживання в будинку.

ПІД-регулятор реалізується за допомогою блоку PID Controller (рис. 2). Цей блок дозволяє просто й якісно реалізувати ПІД-регулятор, при цьому в ньому закладена можливість врахування обмеження вихідного сигналу у певному діапазоні з захистом від перенасичення інтегральної складової. Налаштування ПІД-регулятора проведено комп'ютеризованим методом за допомогою вбудованого в блок PID Controller інструменту для автоматизації процесу розрахунку параметрів регулятора PID Tuner (рис. 3) [5].

За замовчанням інструмент PID Tuner визначає такі параметри регулятора, що забезпечують оптимальне співвідношення критеріїв швидкодії та стійкості системи автоматичного керування. У нашому випадку в системі керування немає факторів, що негативно впливають на її стійкість. Параметри передаточної функції об'єкта керування залишаються практично незмінними (об'єм води та напруга мережі живлення змінюються несуттєво).

Транспортного запізнення також немає, крім того, сама модель об'єкта керування є структурно простою. Тож, при додатковому налаштуванні регулятора акцент зроблений на максимальній швидкодії системи керування.

З рис. 3 видно, що при обраних параметрах регулятора маємо перерегулювання 4,56% (поле Performance and robustness), але в абсолютних одиницях це складає менше 2 °C, що для даного технологічного процесу є цілком припустимим.

**Результати.** Проведемо аналіз результатів моделювання, отриманих за допомогою розробленої імітаційної моделі системи автоматичного керування.

На рис. 4 показана робота системи автоматичного керування без зміни обмеження щодо керуючого сигналу.

Аналіз роботи імітаційної моделі системи автоматичного керування температурою води у пральній машині на рис. 4 показує, що регулятор налаштований коректно.

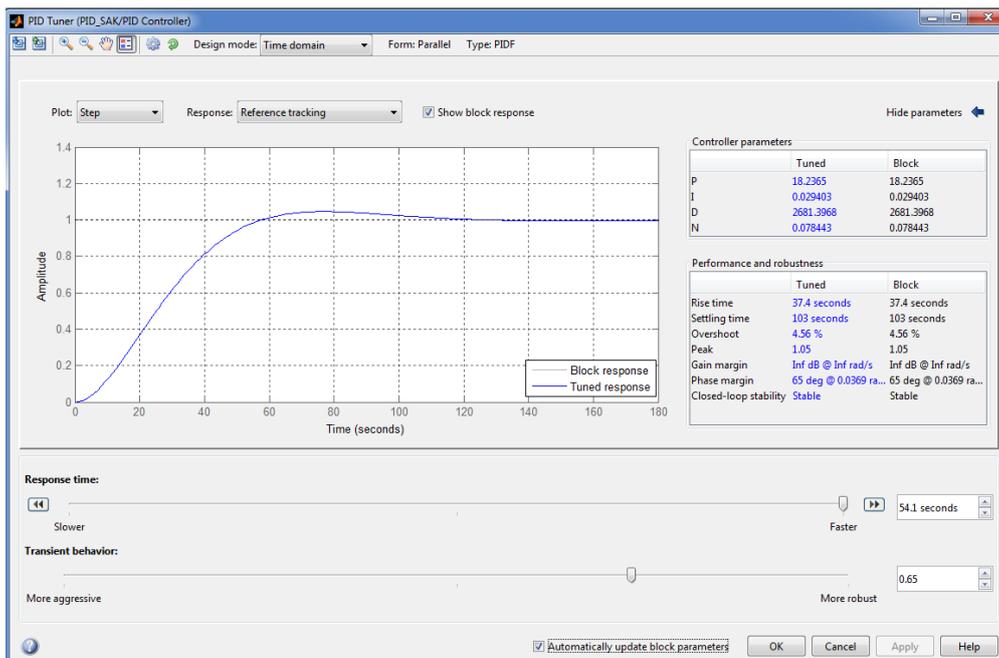
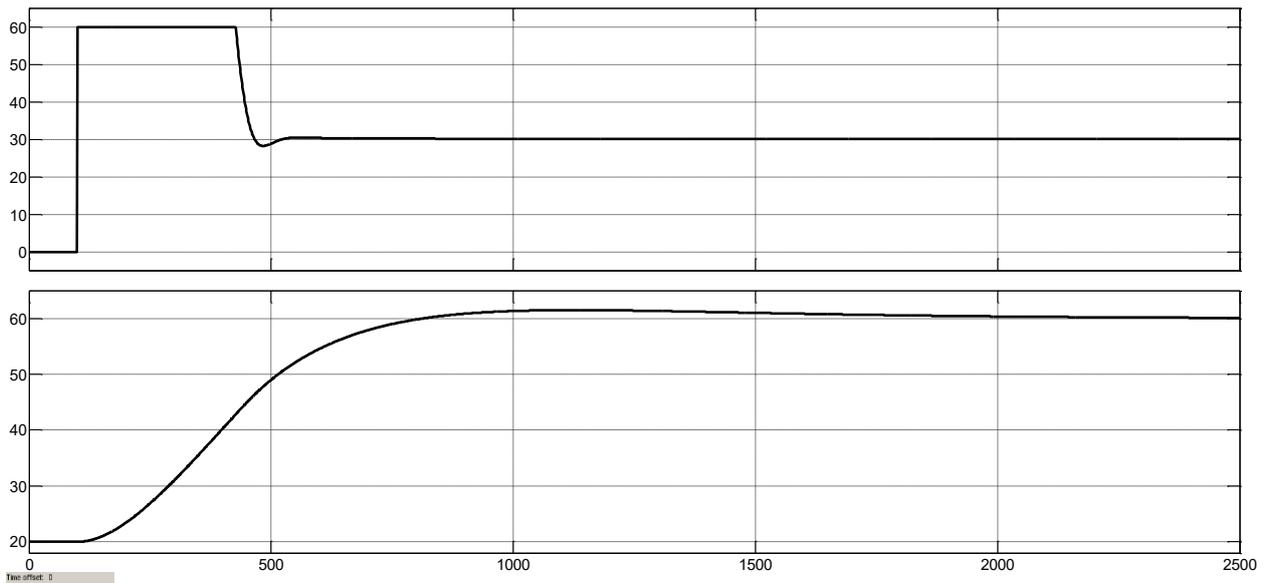
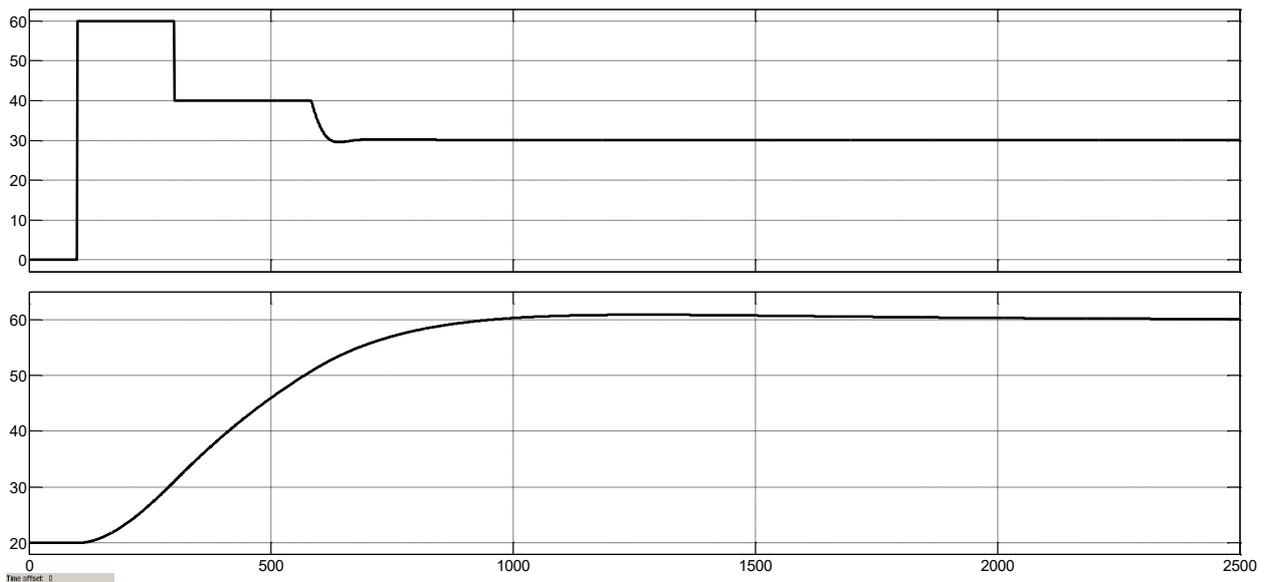


Рис. 3. Вікно налаштувань інструменту PID Tuner, що реалізує комп'ютеризований метод синтезу системи автоматичного керування



**Рис. 4. Зміна у часі потужності ТЕН (зверху) та температури води (знизу) у пральній машині за умови використання ПІД-регулятора без зміни обмеження потужності**



**Рис. 5. Зміна у часі потужності ТЕН та температури води у пральній машині за умови використання ПІД-регулятора з обмеженням потужності**

Те, що керуючий сигнал (верхня частина рис. 4) за формою має досить тривалу ділянку з максимальним значенням (до приблизно 400 с моделювання) та подальшим різким зменшенням до рівня, який забезпечує задану температуру 60 °С, означає, що система має швидкодію, яка наближена до максимальної. Задана температура досягається при цьому за приблизно 700 с з перерегулюванням до 2 °С (нижня частина рис. 4).

Далі проведемо аналіз роботи системи керування при змінному обмеженні щодо керуючого

сигналу. Так, на 300 с моделювання обмеження щодо потужності ТЕН зменшено з 60 до 40 кВт (верхня частина рис. 5).

З аналізу рис. 5 можна зробити висновок, що ПІД-регулятор навіть за умови змінного обмеження щодо керуючого сигналу через зміну системою енергетичного менеджменту тактики розподілу потужності коректно відпрацьовує зміну уставки води. З нижньої частини рис. 5 ми можемо помітити, що температура води збільшується монотонно, без коливань. Перерегулювання залишилося до 5%,

статична похибка відсутня. Таким чином, ПІД-регулятор міг би ефективно виконувати автоматичне керування температурою в умовах динамічно зміненого обмеження щодо потужності ТЕНа, працюючи сумісно з інтелектуальною системою енергетичного менеджменту верхнього рівня.

Але, в роботі ПІД-регулятора можна виділити наступні недоліки, через які його робота сумісно з системою енергетичного менеджменту значно ускладнюється:

– наявність часових інтервалів, де керуючий сигнал змінюється неперервно (в районі 400 с моделювання на верхній частині рис. 5), що ускладнює використання цього споживача електроенергії сумісно з іншими споживачами з точки зору вироблення певної тактики розподілу потужності, оскільки багато споживачів є за характером споживання електроенергії дискретними об'єктами;

– немає можливості спрогнозувати час, протягом якого буде мати місце незмінний рівень споживаної потужності, оскільки сам алгоритм формування керуючого впливу в ПІД-регуляторі це не передбачає.

**Висновки.** Дослідження показали, що класичний ПІД-регулятор з обмеженням діапазону зміни значень вихідного сигналу та захистом від перенасичення його інтегральної

складової, налаштований з використанням комп'ютеризованого методу синтезу системи керування, може коректно відпрацьовувати зміну уставки води за умови змінного обмеження щодо керуючого сигналу через зміну системою енергетичного менеджменту тактики розподілу потужності.

Але, в роботі ПІД-регулятора можна виділити наступні недоліки, через які його робота сумісно з системою енергетичного менеджменту значно ускладнюється:

– наявність часових інтервалів, де керуючий сигнал змінюється неперервно (в районі 400 с моделювання на рис. 2.9,а), що ускладнює використання цього споживача електроенергії сумісно з іншими споживачами з точки зору вироблення певної тактики розподілу потужності, оскільки багато споживачів є за характером споживання електроенергії дискретними об'єктами;

– немає можливості спрогнозувати час, протягом якого буде мати місце незмінний рівень споживаної потужності, оскільки сам алгоритм формування керуючого впливу в ПІД-регуляторі це не передбачає.

Тож, потрібний інший інноваційний підхід щодо синтезу системи автоматичного керування температурою води у пральній машині, в якому будуть усунуті перелічені недоліки.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Stolojescu-Crisan, C., Crisan, C., & Butunoi, B. P. An IoT-Based Smart Home Automation System. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2021, 21(11), 3784. <https://doi.org/10.3390/s21113784>
2. Ван Чунжі, Яцишин, С.П., Лиса, О.В. & Мідик, А-В. В. Кіберфізичні системи та їх програмне забезпечення. *Вимірювальна техніка та метрологія*, 2018, 79 (1), 34-38. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.034>
3. Бубликов А.В., Рибачук І.С. Кіберфізична система автоматичного керування температурою води у пральній машині. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації». 2022. С. 332-333. <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf>
4. Рибачук І. С. Синтез та дослідження кіберфізичної системи автоматичного керування температурою води у барабані промислової пральної машини : кв. роб. ... магістра зі спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Рибачук Ілля Сергійович. Д.: НТУ «ДП». 2023. 111 с. <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/164290?show=full>
5. Дослідницька частина в кваліфікаційній роботі магістра: навч. посіб. / В.Г. Шаруда, В.В. Ткачов, А.В. Бубликов; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ. 2015. 487 с.

#### REFERENCES:

1. Stolojescu-Crisan, C., Crisan, C., & Butunoi, B. P. (2021). An IoT-Based Smart Home Automation System. *Sensors* (Basel, Switzerland), 21(11), 3784. <https://doi.org/10.3390/s21113784>
2. Wang Chunzhi, Yatsyshyn, S.P., Lysa, O.V. & Midyk, A-V. V. (2018). Kiberfizychni systemy ta yikh prohranne zabezpechennia [Cyber-physical systems and their software]. *Measuring technique and metrology*, 79 (1), 34-38. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.034> [in Ukrainian].
3. Bublikov A.V., Rybachuk I.S. (2022). Kiberfizychna systema avtomatychnoho keruvannia temperaturoiu vody u pralni mashyni [A cyber-physical system for automatic water temperature control in a washing machine].

Materials of the 10th international scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists "Youths: science and innovation". pp. 332-333. Retrieved from: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf> [in Ukrainian].

4. Rybachuk I. S. (2023). Syntez ta doslidzhennia kiberfizychnoi systemy avtomatychnoho keruvannia temperaturoiu vody u barabani promyslovoi pralnoi mashyny : kv. rob. ... mahistra zi spets. 151 «Avtomatyziatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii» [Synthesis and research of a cyber-physical system of automatic water temperature control in the drum of an industrial washing machine: qualifying work on master's degree in specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies"] D.: NTU "DP". 111 p. Retrieved from: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/164290?show=full>

5. Sharuda V.G., Tkachev V.V., Bublikov A.V. (2015). Doslidnytska chastyna v kvalifikatsiinii roboti mahistra: navch. posib [The research part of the master's qualification work: teaching. manual]. Ministry of Education and Science of Ukraine, National mountain Univ. D.: NSU. 487 p. [in Ukrainian].

УДК 681.5:629.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-9>

## НЕЧІТКА СУПЕРВІЗОРНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ ПАРУ КОТЛОАГРЕГАТУ

**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

**Олійник Ігор Олександрович,**

магістр кафедри автоматизації виробничих процесів

Донбаська державна машинобудівна академія

ORCID ID: 0009-0006-3712-8659

**Потоцький Сергій Вікторович,**

магістр кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0002-8135-6991

**Бобов Гліб Романович,**

магістр кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0000-0983-0017

*У статті розглянуто синтез нечіткого регулятора системи автоматичного керування тиском пари парового котла, проведено порівняльний аналіз перехідних процесів регулювання тиском пари під час застосування класичного ПІД-регулятора та із застосуванням нечіткого регулятора, підключеного паралельно в режимі супервізора. Проведено аналіз наявних систем автоматичного регулювання тиском пари, що відходить з парового котла. На початковому проведено проаналізовані недоліки наявних котельних установок та їх системи управління. На підставі проведеного аналізу окреслені шляхи усунення виявлених недоліків. Реалізовані задачі дослідження особливостей технологічного процесу пароутворення; проведено удосконалення математичної моделі і алгоритму регулювання технологічним процесом пароутворення шляхом впровадження нечіткого регулятора в режимі супервізора, який функціонує паралельно з класичним ПІД-регулятором; запропонована математична модель автоматизованої системи керування тиску подачі газоповітряної суміші на горіння; розроблено структуру та алгоритм функціонування автоматизованої системи керування котельним агрегатом з використанням нечіткого регулятора в супервізорному режимі роботи. Запропонована математична модель режиму пароутворення у котлі, яка відрізняється тим, що враховує змінні технологічні параметри, а також алгоритм роботи нечіткого регулятора в супервізорному режимі роботи витратою повітря на горіння, які відрізняються тим, що враховують показник розрідження у топці котла. Запропоновано розроблення автоматизованої системи управління пароутворенням у котлі тину ДЕ, яка містить сучасну контрольну-вимірювальну апаратуру температури, витрати й тиску пара, газу та повітря, яке підводиться до пальників. Модернізація АСУ спрямована на підвищення продуктивності котельної установки і зниження витрат енергоносіїв (газу і повітря на горіння), яке досягає у відносному значенні 18%.*

**Ключові слова:** котел паровий, автоматизація, система управління, регулятор, нечітка логіка, супервізор.

**Razhyvin Oleksii, Oleiinyk Ihor, Pototskyi Serhii, Bobov Hlib. Fuzzy supervisory system of automated regulation of steam pressure of boiler unit**

The article deals with the synthesis of a fuzzy regulator of the automatic steam pressure control system of a steam boiler, a comparative analysis of the transient processes of steam pressure regulation when using a classical PID regulator and with the use of a fuzzy regulator connected in parallel to the supervisor mode is carried out. An analysis of the existing systems of automatic pressure regulation of the steam leaving the steam boiler was carried out. At the initial stage, the shortcomings of existing boiler plants and their management systems were analyzed. Based on the analysis, ways to eliminate the identified shortcomings are planned. The following tasks of the study

of the peculiarities of the technological process of vaporization were set and implemented; the improvement of the mathematical model and the algorithm of regulation of the technological process of vaporization was carried out by introducing a fuzzy controller in the supervisor mode, which functions in parallel with the classic PID controller; the proposed mathematical model of the automated control system of the gas-air mixture supply pressure for combustion; the development of the structure and algorithm of the functioning of the automated boiler unit control system using a fuzzy controller in the supervisory mode of operation was carried out. A mathematical model of the mode of steam formation in the boiler is proposed, which differs in that it takes into account variable technological parameters, as well as the algorithm of operation of the fuzzy controller in the supervisory mode of operation of air consumption for combustion, which differs in that it takes into account the rarefaction index in the boiler furnace. It is proposed to develop an automated system for controlling steam generation in a DE boiler, which includes modern control and measurement equipment for the temperature, flow and pressure of steam, gas and air supplied to the burners. The modernization of the control system is aimed at increasing the productivity of the boiler plant and reducing the consumption of energy carriers (gas and air for combustion), which reaches up to 18% in relative terms.

**Key words:** steam boiler, automation, control system, regulator, fuzzy logic, super-visor.

В Україні рівень енергоспоживання на одиницю валового національного продукту значно вище, ніж у передових промислово розвинених країнах, що призводить до істотного подорожчання і зниження конкурентоспроможності продукції, що виробляється. За оцінками економістів, це перевищення складає більше 45%, що свідчить про необхідність впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій в паливно-енергетичний комплекс країни [1]. Оскільки частка вироблення теплоти в загальному енергетичному балансі України складає 55%, з яких 40% припадають на котельні господарства та підприємств [2], в умовах дорожчечі природного газу і мазуту вдосконалення, розроблення і впровадження енергозберігаючих технологій є важливими і актуальними стратегічними завданнями розвитку теплоенергетики та промисловості.

Автоматичні системи управління технологічними процесами котлів являють собою функціонально закінчену систему, призначену для виконання всіх функцій управління котлом як в автономному режимі, так і в складі MES-систем.

Паровий котел є енергетичною установкою, в процесі експлуатації якої з високою динамічною змінюються пов'язані між собою технологічні параметри. АСУТП дає змогу оптимізувати ці параметри з економічних, екологічних, ергономічних та інших показників [8].

Котельна установка є складним взаємопов'язаним об'єктом. Функціональна схема установки наведена рис. 1. Рівень автоматизації, представлений на рисунку, відповідає базовому рівню. Усі незадіяні в цій моделі параметри установки не показані.

Тиск пари в барабані котла контролюється датчиком (PICAS 01). Природний газ як паливо у топку котлу подається під невеликим надлишковим тиском. Тиск безпосередньо перед топкою контролюється датчиком (PICAS 02),

подача газу регулюється клапаном з електричним приводом V1. Повітря в топку котла подається повітропроводом і нагнітається вентилятором для дуття. Тиск безпосередньо перед топкою контролюється датчиком (PICAS 03), регулює подачу повітря шибера з електричним приводом V2. Розрідження в топці котла контролюється датчиком (PICAS 04), яке регулюється шиберам з електричним приводом V3. Рівень води в барабані котла контролюється датчиком (LICAS 10). подача живильної води регулюється через клапан з електричним приводом V4.

Як електричний привід (виконавчий механізм – V) у всіх випадках використовуються МЕО – механізми електричні однообертові, що забезпечують переміщення регулюючого органу з положення «відкрито» в положення «закрито» і назад за один оборот ВМ.

Для ідентифікації технологічних параметрів котельної установки як об'єкта керування розглянуто контури регулювання, взаємозв'язку між ними і виконано ідентифікацію об'єкта за кожним контуром. Ідентифікацію виконано за перехідними характеристиками (кривими розгону), які отримано на реальному об'єкті та наведено у паспорті котлоагрегату.

На рис. 2 представлено структурну схему системи управління паровим котлом за каналами управління.

Аналіз динаміки об'єкта показує, що по всіх каналах регулювання об'єкт може бути ідентифікований як аперіодична ланка першого порядку з чистим запізненням, тобто об'єкт, що описується диференціальним рівнянням першого порядку із запізненням [3; 4].

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_0 u(t - \tau), \quad y(0) = 0. \quad (1)$$

Реакція такого об'єкта на вхідне ступеневе збурення:

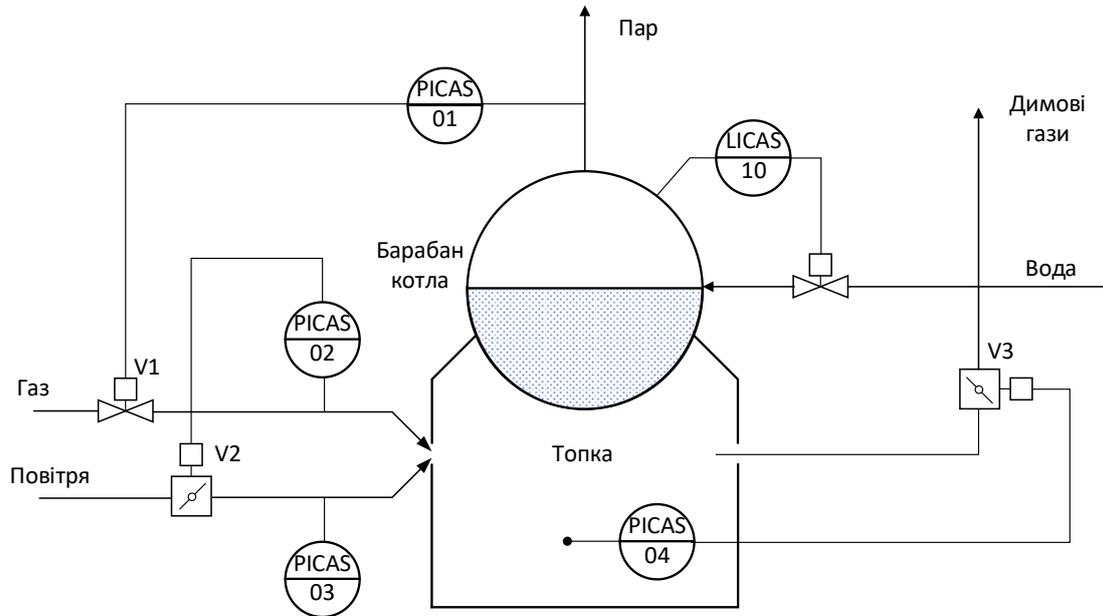


Рис. 1. Функціональна схема автоматизації котельної установки

$$u(t) = U^* 1, (t)$$

де  $U$  – амплітуда одиничного ступінчастого впливу.

Потрібно визначити параметри транспортного запізнення  $\tau$ , коефіцієнта передачі  $K_0$ , постійного часу  $T$  об'єкта.

Рішення рівняння 1 має такий вигляд:

$$y(t) = h(t) = K_0 \left( 1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right), t \geq \tau. \quad (2)$$

Під час проведення моделювання залежності тиску пари від тиску газу та тиску повітря від тиску газу використано методику досліджень з роботи [2]. Щоб встановити зв'язок  $P_z = f(P_{пара})$  виконано низку досліджень, сенс яких полягає у визначенні реакції тиску пари на зміну тиску газу. За відносно постійного оптимального навантаження, що визначається витратою пари, та постійного тиску пари ( $P_{пара} = \text{const}$ ) змінюється тиск газу. Усі системи регулювання, пов'язані з витратою газу, працюють штатно.

Визначено, що зв'язок між тиском описується лінійним виразом:

$$P_{пара} = A + BP_z = 7,55 + 0,12P_z.$$

Для узагальненої моделі потрібен зворотний вираз, який пов'язує тиск пари з тиском газу:

$$P_z = 83,33(P_{пара} - 7,55).$$

Залежність співвідношення повітря/газ наведено у паспорті котла й може бути з доволі високою точністю апроксимованою залежністю:

$$P_n = -1,625 + 0,1875P_z.$$

Модель об'єкта по каналу регулювання тиску пари:

$$W_{пара}(p) = \frac{0.533}{180p + 1} e^{-100p}. \quad (3)$$

Модель об'єкта по каналу регулювання тиску повітря:

$$W_n(p) = \frac{0.1875}{4,3p + 1} e^{-2,4p}. \quad (4)$$

Модель об'єкта каналу регулювання розрідження:

$$W_p(p) = \frac{0,4}{10p + 1} e^{-5p}. \quad (5)$$

Модель об'єкта по каналу регулювання рівня.

Модель барабана (Об'єкт 4-1) представлена у вигляді аперіодичної ланки із запізненням:

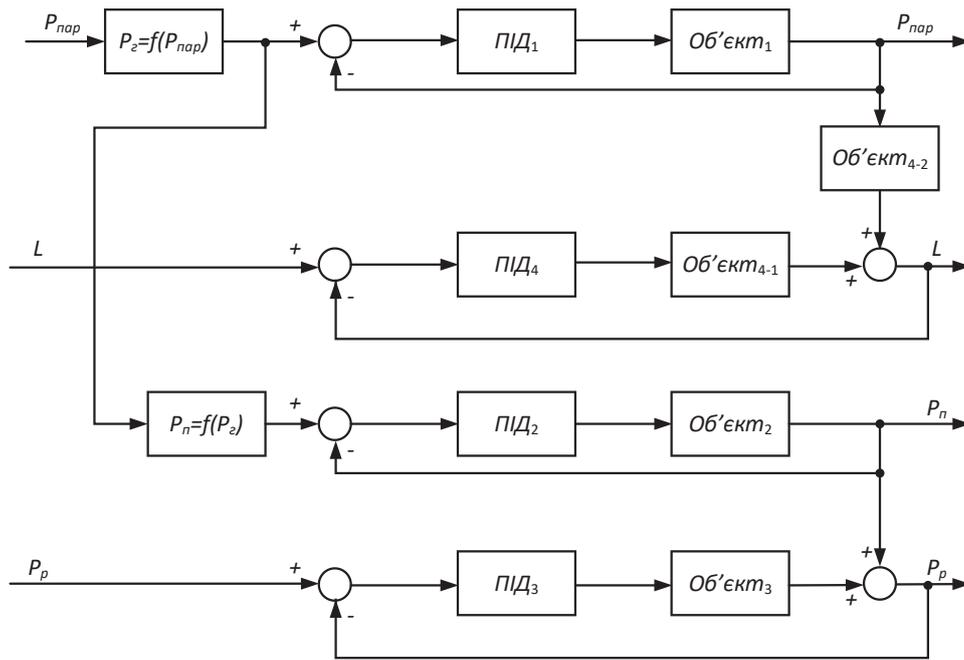
$$W_{4-1}(p) = \frac{12}{100p + 1} e^{-3p}. \quad (6)$$

Модель також включає ланку, що імітує явище «розширення» рівня (Об'єкт 4-2):

$$W_{4-2}(p) = \frac{0,046}{p + 1}, \quad (7)$$

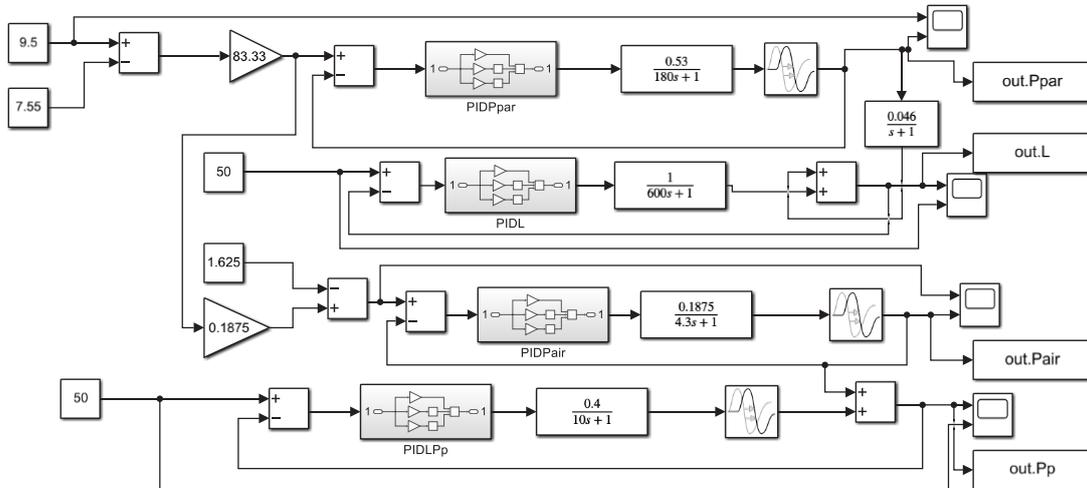
де  $K_n$  – швидкість «розширення»;  $T_n$  – постійна часу «розширення».

За результатами ідентифікації параметрів математичної моделі котла (рис. 2) проведено дослідження системи управління котельною установкою та параметрів управління на математичній моделі АСУ котельною установкою за ПІД-законом регулювання й застосування нечіткого регулятора супервізором у режимі



**Рис. 2. Структурна схема математичної моделі системи управління котлом**

$P_{\text{пара}}$  – тиск пара;  $L$  – рівень води в барабані котла;  $P_{\text{г}}$  – тиск газу;  $P_{\text{п}}$  – тиск повітря;  $P_{\text{р}}$  – розрядження в топці котла; ПІД1, 2, 3, 4 – ПІД-регулятори;  $P_{\text{г}} = f(P_{\text{г}})$  – залежність тиску пара від тиску газу;  $P_{\text{п}} = f(P_{\text{г}})$  – залежність тиску повітря від тиску газу (крива співвідношення «газ/повітря»)



**Рис. 3. Математична модель АСУ котельною установкою**

коригування коефіцієнтів передачі ПІД-регулятора.

Моделювання системи керування котельною установкою виконано у пакеті програм MATLAB Simulink. Налаштування ПІД-регуляторів виконується методом Циглера – Нікольса [3; 4].

На рис. 3 представлено математична модель системи керування котельною установкою з ПІД-регуляторами, яка побудована відповідно до структурної схеми, наведеної на рис. 2, та ідентифікованих передаточних функцій за каналами управління (4...7).

У класичній теорії автоматичного управління структура регулятора вибирається з моделі об'єкта управління. Складні об'єкти управління вимагають застосування складних регуляторів. Однак на практиці переважно регулювання зводиться до використання ПІД-регуляторів, що мають такий вигляд [3; 4]:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (8)$$

де  $k_p$  – пропорційний коефіцієнт підсилення регулятора;  $k_i$  – інтегральний коефіцієнт

підсилення регулятора;  $k_d$  – диференціальний коефіцієнт підсилення регулятора.

Налаштування параметрів ПІД-регулятора контурів, тиску пару, газоповітряної суміші, розрідження у топці котлу та рівня рідини у барабані котлу виконано методом Циглера – Нікольса [3; 7] для розімкненої системи. Результати розрахунку коефіцієнтів регуляторів наведені у табл. 1.

Після визначення параметрів регуляторів промодельовані перехідні процеси для замкнутої системи, які показано на рис. 4–7.

Проведене математичне моделювання технологічних параметрів котельного агрегату показало, що використання класичного ПІД-регулятора потребує корегування коефіцієнтів передачі.

1) Для перехідного процесу регулювання тиску пару потрібно зменшити коливання перехідної характеристики та збільшити швидкодію процесу, що потребує корегування інтегрального коефіцієнта ПІД-регулятора.

2) Для перехідного процесу регулювання рівня в барабані котла потрібно зменшити коливання перехідної характеристики та зменшити динамічну похибку, що потребує корегування інтегрального коефіцієнта ПІД-регулятора.

3) Для перехідного процесу тиску повітря ГПС та розрідження в топці котла потрібно зменшити коливання перехідної характеристики та зменшити динамічну похибку, що потребує корегування інтегрального коефіцієнта ПІД-регулятора.

Для реалізації зазначених корегувань застосуємо нечіткий регулятор, який буде включено паралельного класичному ПІД-регулятору. Вихідними значеннями нечіткого регулятора повинні буди коригуючі параметри коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Ідея нечіткого супервізора полягає в організації дворівневої системи, в якій на нижньому

рівні розташовано звичайний ПІД-регулятор, а на верхньому – нечіткий регулятор (НЛР) (рис. 8) [6; 7].

Призначення нечіткого регулятора, який функціонує в режимі супервізора, полягає в тому, щоб автоматично змінювати коефіцієнти ПІД-регулятора на різних стадіях перехідного процесу. У ПІД-регуляторі є три вхідні змінні, тому вважатиметься, що його коефіцієнт посилення складається з трьох складників [3; 5].

$$K_{PID} = K_p + K_i + K_d.$$

Лінгвістичні значення нормалізованих коефіцієнтів ПІД-регулятора можна описати за допомогою семи термів з найменуваннями «нульовий (Н)», «малий 1 (M1)», «малий 2 (M2)», «середній 1 (C1)», «середній 2 (C2)», «Великий 1 (B1)», «Великий 2 (B2)» Лінгвістичні правила для нечіткого регулятора в режимі супервізора наведені у табл. 2.

Для опису нечіткого регулятора задається FIS editor із системою нечіткого логічного висновку Mamdani. Для створюваної системи вибирається вид логічного зв'язку (And method – min) та (Or method – max), вид імплікації (Implication – min), спосіб агрегування висновків правил (Aggregation – max) та метод дефазифікації (Defuzzification – centroid).

У меню Edit послідовно додано 2 вхідні змінні з розміром базової шкали (Range = [-300 200] – для «похідної помилки управління», Range = [-800 800] – для «помилки управління») та три вихідні змінні з розміром базової шкали (Range = [0 1]).

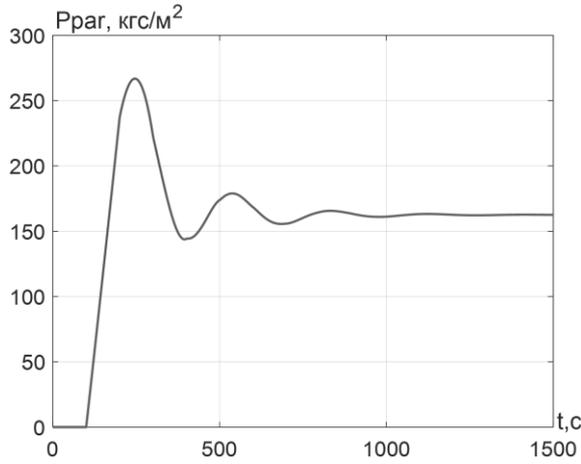
На рис. 9 показано схему моделювання АСУ з нечітким супервізором ПІД-регуляторів з контурами регулювання технологічних параметрів.

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності задано для кожної

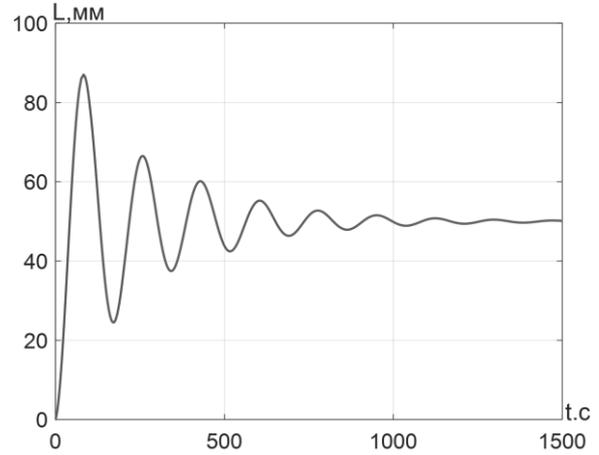
Таблиця 1

Результати розрахунку коефіцієнтів регуляторів

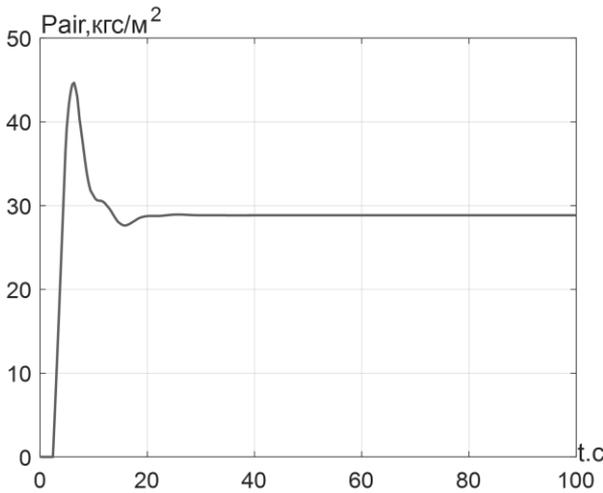
| Контур регулювання     | Передаюча функція                               | $k_p$          | $k_i$          | $k_d$            |
|------------------------|---|----------------|----------------|------------------|
| Тиску пару             | $W(p) = \frac{0,53}{180p + 1} e^{-100\tau p}$   | $1.2T/(K_0 t)$ | $0.9T/(K_0 t)$ | $0,5T/K_0=169,8$ |
| Рівня в барабані котла | $W(p) = \frac{1}{600p + 1}$                     | $1.2T/(K_0 t)$ | $0.9T/(K_0 t)$ | $0,5T/K_0=4,2$   |
| ГПС                    | $W(p) = \frac{0,1875}{4,3p + 1} e^{-2,4\tau p}$ | $1.2T/(K_0 t)$ | $0.9T/(K_0 t)$ | $0,5T/K_0=11,5$  |
| Розрідження в топці    | $W(p) = \frac{0,4}{10p + 1} e^{-5\tau p}$       | $1.2T/(K_0 t)$ | $0.9T/(K_0 t)$ | $0,5T/K_0=12,5$  |



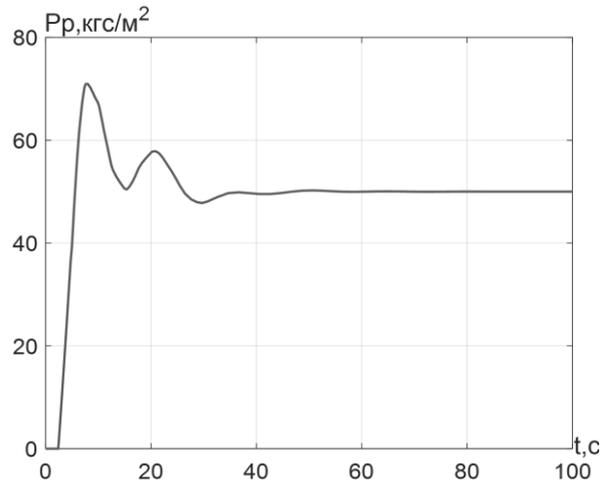
**Рис. 4. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску пару з ПІД-регулятором**



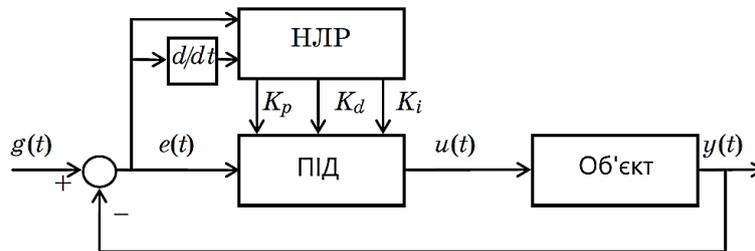
**Рис. 5. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання рівня в барабані котла з ПІД-регулятором**



**Рис. 6. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску повітря ГПС з ПІД-регулятором**



**Рис. 7. Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску розрідження в топці котла з ПІД-регулятором**



**Рис. 8. Структурна схема нечіткого супервізора**

змінної трикутну функцію приналежності. За результатами функціонування нечіткого регулятора побудовано графічне подання закону управління (рис. 10).

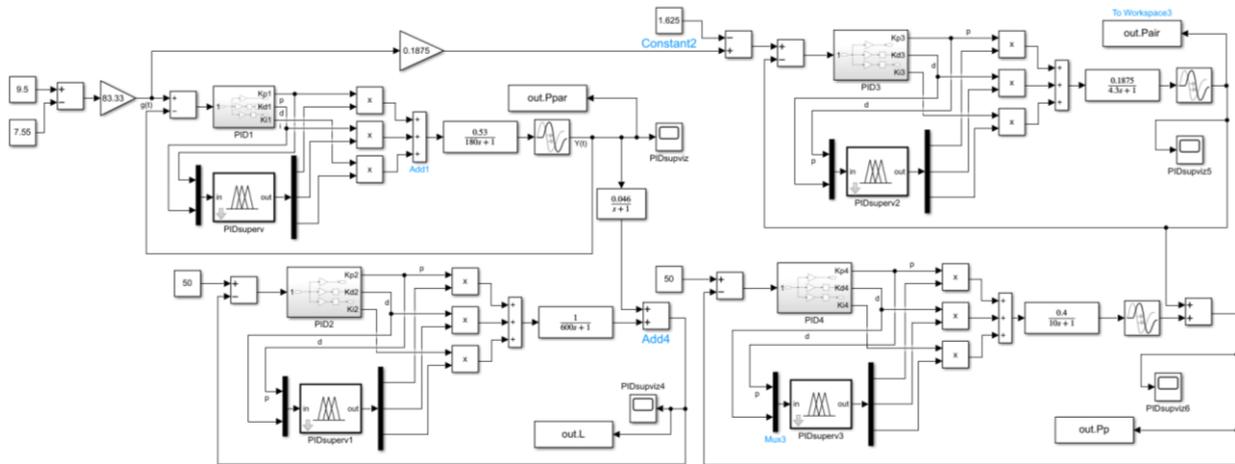
На рис. 11–14 показано перехідний процес у системі управління з нечітким супервізором.

Проведене математичне моделювання технологічних параметрів котельного агрегату показало, що використання нечіткого регулятора в супервізорному режимі дало змогу скоригувати коефіцієнт передачі класичного ПІД-регулятора.

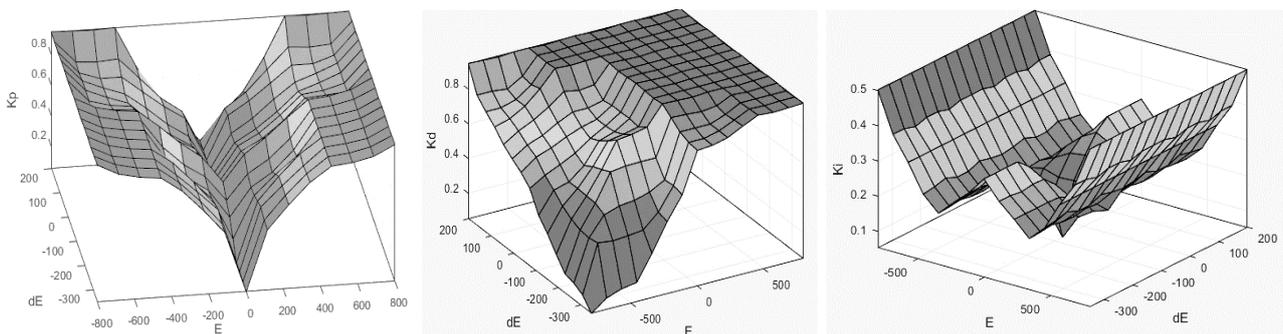
Таблиця 2

**Правила корегування коефіцієнтів ПІД-регулятора нечітким супервізором**

| №  | $e$ | $delt dt$ | $K_p$ | $K_D$ | $K_I$ | №  | $e$ | $delt dt$ | $K_p$ | $K_D$ | $K_I$ |
|----|-----|-----------|-------|-------|-------|----|-----|-----------|-------|-------|-------|
| 1  | НВ  | НВ        | В2    | Н     | С1    | 14 | Н   | ПМ        | М1    | В2    | М2    |
| 2  | НВ  | НМ        | В2    | М1    | С1    | 15 | Н   | ПВ        | М1    | В2    | М2    |
| 3  | НВ  | Н         | В2    | С1    | С1    | 16 | ПМ  | НВ        | В1    | В2    | М1    |
| 4  | НВ  | ПМ        | В2    | С2    | С1    | 17 | ПМ  | НМ        | В1    | В2    | М1    |
| 5  | НВ  | ПВ        | В2    | В2    | С1    | 18 | ПМ  | Н         | В1    | В2    | М1    |
| 6  | НМ  | НВ        | В1    | М1    | М1    | 19 | ПМ  | ПМ        | С2    | В2    | М1    |
| 7  | НМ  | НМ        | В1    | В1    | М1    | 20 | ПМ  | ПВ        | В2    | В2    | М1    |
| 8  | НМ  | Н         | В1    | С2    | М1    | 21 | ПВ  | НВ        | В2    | В2    | С1    |
| 9  | НМ  | ПМ        | С2    | В2    | М1    | 22 | ПВ  | НМ        | В2    | В2    | С1    |
| 10 | НМ  | ПВ        | В2    | В2    | М1    | 23 | ПВ  | Н         | В2    | В2    | С1    |
| 11 | Н   | НВ        | Н     | В1    | М2    | 24 | ПВ  | ПМ        | В2    | В2    | С1    |
| 12 | Н   | НМ        | Н     | В2    | М2    | 25 | ПВ  | ПВ        | В2    | В2    | С1    |
| 13 | Н   | Н         | М2    | В2    | Н     |    |     |           |       |       |       |



**Рис. 9. Математичне моделювання системи управління з нечітким супервізором ПІД регулятора**

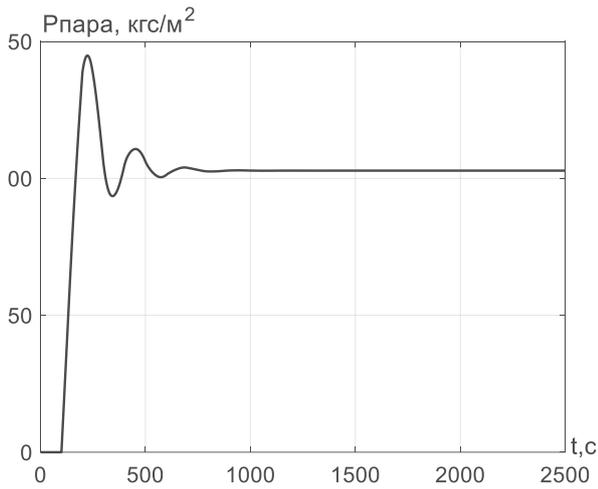


**Рис. 10. Поверхні управління системою нечіткого висновку**

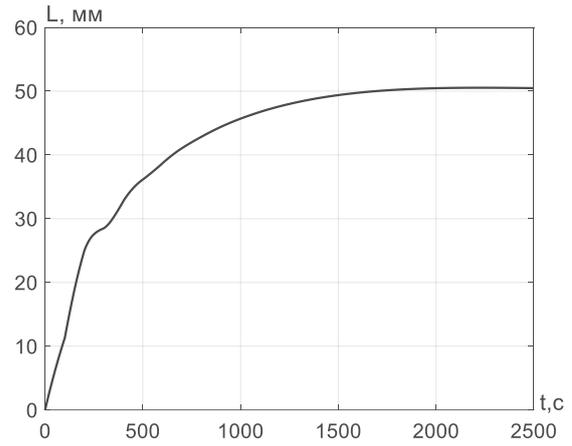
В результаті використання нечіткого регулятора в супервізорному режимі покращено такі показники АСУ:

- для перехідного процесу регулювання тиску пару треба зменшити коливання перехідної характеристики та збільшити швидкодію процесу;

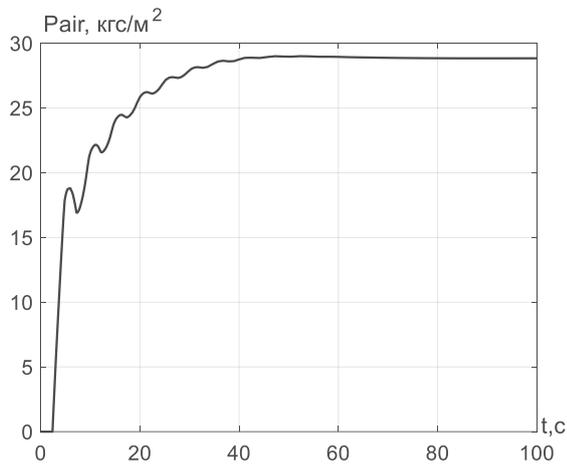
- для перехідного процесу регулювання рівня в барабані котла треба зменшити коливання перехідної характеристики та зменшити динамічну похибку;
- для перехідного процесу тиску повітря ГПС та розрідження в топці котла треба зменшити коливання перехідної характеристики та зменшити динамічну похибку.



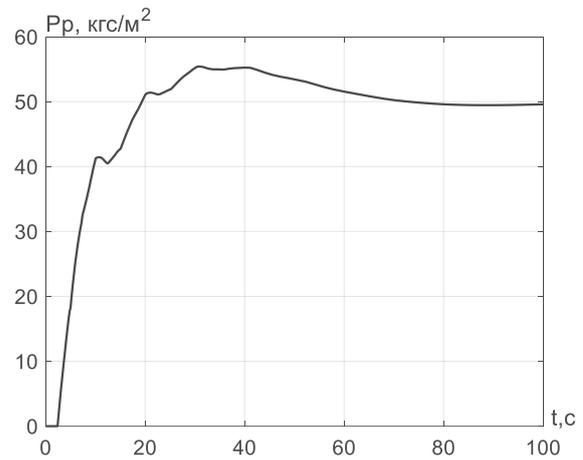
**Рис. 11.** Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску пару з нечітким супервізором ПІД-регулятора



**Рис. 12.** Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання рівня в барабані котла з нечітким супервізором ПІД-регулятора



**Рис. 13.** Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску повітря ГПС з нечітким супервізором ПІД-регулятора



**Рис. 14.** Графік перехідного процесу в замкненій системі контуру регулювання тиску розрідження в топці котла з нечітким супервізором ПІД-регулятора

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Халатов А.А. Энергетика Украины: сучасний стан і найближчі перспективи. *Вісник НАН України*. 2016. № 6. С. 53–61.
2. Баган Т.Г. Робастне керування інерційними контурами котлоагрегату зі змінними параметрами на базі внутрішньої моделі: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Київ, 2016. 152 с.
3. Taiwo O. Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning. *IEE Proc., Control Theory Appl.* 2006. № 140 (5). P. 323–327.
4. Ковриго Ю.М., Баган Т.Г., Бунке О.С. Методи забезпечення стійкості систем регулювання на базі ПІ та ПІД регуляторів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. № 3/3 (63). С. 58–63.
5. Штіфзон О.Й., Новіков П.В., Баган Т.Г. Розробка адаптуючого fuzzy-logic пристрою для керування в умовах параметричної нестационарності. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2018. Т. 1. № 2.
6. Новіков П.В., Бунке О.С. Інтелектуальна система керування інерційними технологічними параметрами на базі fuzzy-регулятора. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XV міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ.* Київ, 2017.

7. Нейронні мережі в системах автоматизації: курс лекцій з дисципліни «Нейронні мережі в системах автоматизації» / уклад. О.В. Разживін. Запоріжжя: ТОВ «Технічний Університет «Метінвест Політехніка»», 2023. 296 с.

8. Разживін О.В., Бережна О.В., Сахацький С.О., Мурат В.М. Синтез систем управління динамічними процесами у котлі із застосуванням нейронної мережі прямого поширення. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2023. Т. 3. № 103. С. 13–21.

#### REFERENCES:

1. Khalatov A.A. (2016). Enerhetyka Ukrainy: suchasnyy stan i nayblyzhchi perspektyvy [Energy of Ukraine: current state and nearest prospects]. *Visnyk NAN Ukrainy*. № 6, pp. 53–61. [in Ukrainian]

2. Bahan T.H. (2016). Robastne keruvannya inertsynymy konturamy kotloahrehatu zi zminnymy parametramy na bazi vnutrishn'oyi modeli: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.07 [Robust control of inertial circuits of the boiler unit with variable parameters based on the internal model: dissertation. ... candidate technical Sciences: 05.13.07]. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Kyiv. 152 s. [in Ukrainian]

3. Taiwo O. (2006). Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning. *IEE Proc., Control Theory Appl.* № 140 (5), pp. 323–327.

4. Kovryho Yu.M., Bahan T.H., Bunke O.S. (2013). Metody zabezpechennya stiykosti system rehulyuvannya na bazi PI ta PID rehulyatoriv [Methods of ensuring the stability of regulation systems based on PI and PID regulators]. *Skhidno-yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. № 3/3 (63), pp. 58–63. [in Ukrainian]

5. Shtifzon O.Y., Novikov P.V., Bahan T.H. (2018). Rozrobka adaptuyuchoho fuzzy-logic prystroyu dlya keruvannya v umovakh parametrychnoyi nestatsionarnosti [Development of an adaptive fuzzy-logic device for control in conditions of parametric non-stationarity]. *Skhidno-yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. Т. 1. № 2. [in Ukrainian]

6. Novikov P.V., Bunke O.S. (2017). Intelektualna systema keruvannya inertsynymy tekhnolohichnymy parametramy na bazi fuzzy-rehulyatora [An intelligent system for controlling inertial technological parameters based on a fuzzy controller]. *Suchasni problemy naukovooho zabezpechennya enerhetyky: XV mizhnar. nauk.-prak. konf. asp., mah. i stud. K.* [in Ukrainian]

7. Razzhyvin O.V. (uklad.) (2023). Neyronni merezhy v systemakh avtomatyzatsiyi: kurs lektsiy z dystsypliny "Neyronni merezhy v systemakh avtomatyzatsiyi" [Neural networks in automation systems: a course of lectures on the discipline "Neural networks in automation systems"]. Zaporizhzhya: TOV "Tekhnichnyy Universytet "Metinvest Politekhnik". 296 s. [in Ukrainian]

8. Razzhyvin O.V., Berezhna O.V., Sakhatskyi S.O., Murat V.M. (2023). Syntez system upravlinnya dynamichnymy protsesamy u kotli iz zastosuvannyam neyronnoyi merezhi pryamoho poshyrennya [Synthesis of control systems for dynamic processes in a boiler using a forward propagation neural network]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*. Т. 3. № 103, pp. 13–21. [in Ukrainian]

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

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-10>

## AUTOMATED CONTROL OF DRIVES FOR OPEN-PIT DRILLING RIGS

**Khilov Victor Serhiiovych,**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor of the Department of Automation, Electrical and Robotic Systems  
LTD "METINVEST POLYTECHNIC TECHNICAL UNIVERSITY"  
ORCID ID: 0000-0002-5583-4323

*Physical and moral aging of mining equipment, in particular drilling rigs is one of the main problems of the open method of mineral extraction in the quarries of Ukraine. The modernization of the existing park and the creation of a new generation of drilling rigs is an important scientific and applied problem, the success of which depends on the efficiency of the domestic mining industry. The teams of special design bureau of research institutes of Ukraine are engaged in the creation of domestic core drilling rigs. Along with the improvement of the hydromechanical equipment of drilling rigs, it is necessary to improve the drive systems, which must correspond to the achieved level in the global electrical engineering industry. Only in this case, it is possible to create a competitive drilling roller-cone bit at a whole. The issue of finding and choosing a rational way of controlling interconnected drive systems of rotation and feeding rod in the hole button zone is considered. An important issue in the development of rotation and feed drives is the choice of a method of mutual control. The control methods are analyzed in which one of the parameters is maintained at a constant level: the rotation frequency of the roller-cone bit, the moment of resistance on the roller-cone bit, the linear speed of the drilling rod movement, the axial pressure on the drilling rod, the power consumed by the rotation drive. Based on the energy criterion of stability of the roller-cone bit, the most rational way of controlling the drive of drilling rod rotation of the drilling rig was chosen. The roller-cone bit will have the greatest stability when its energy load is uniform, i.e. when maintaining a linear growth of rock destruction energy or when maintaining at a constant level the power released in the roller-cone bit and hole bottom contact zone. The proposed working ability criterion generalizes the known criteria because it automatically considers the strength and abrasiveness of the rock that is destroyed by the roller-cone bit. In the proposed method of controlling the feed drives and rotation of the drilling rod in the process by the roller-cone bit drilling, rigid mechanical characteristics are formed on the roller-cone bit when penetrating rocks with a strength of 10-13 units on the scale of Prof. M.M. Protodiakonov and soft mechanical characteristics – in stronger rocks. When drilling different strength of the rocks of physical and mechanical properties, the control method provides automatic selection of mechanical characteristics depending on the strength of the rock.*

**Key words:** drilling rod, rotation drive, feed drive, control method.

### **Хілов В.С. Автоматизоване керування приводами кар'єрного бурового станка**

*Фізичне і моральне старіння гірничого устаткування, зокрема бурових верстатів, є однієї з основних проблем відкритого способу видобутку корисних копалин на кар'єрах України. Модернізація наявного парку і створення нового покоління бурових верстатів є важливою науково-прикладною проблемою, від успішного вирішення якої залежить працездатність вітчизняного гірничорудного виробництва. Створенням вітчизняних верстатів шарошкового буріння займаються колективи спеціальних конструкторських бюро науково-дослідних інститутів України. Разом з удосконалюванням гідромеханічного устаткування бурових верстатів необхідно покращувати і приводні системи, які повинні відповідати досягнутому рівню у світовій електротехнічній промисловості. Тільки так можна створити конкурентоспроможний буровий верстат загалом. Розглянуто питання пошуку та вибору раціонального способу керування взаємопов'язаними приводними системами обертання та подачі поставу в зону вибою. Проаналізовано способи керування, за яких підтримується на постійному рівні один з параметрів: частота обертання поставу, момент опору на долоті, лінійна швидкість пересування поставу, осьовий тиск на постав, потужність, що споживається приводом обертання. Виходячи з енергетичного критерію стійкості долота, розроблено раціональний спосіб управління приводом обертання поставу верстата шарошечного буріння. Найбільшу стійкість долото матиме за його рівномірного енергетичного навантаження, тобто за підтримки лінійного зростання енергії руйнування породи чи за підтримки на постійному рівні потужності, яка виділяється у зоні контакту «долото – вибій». Запропоновано критерій працездатності, який узагальнює відомі критерії, тому що автоматично враховує міцність та абразивність породи, яка руйнується шарошковим долотом. За запропонованого способу керування приводами подачі та обертання поставу в процесі шарошкового буріння формуються жорсткі механічні характеристики на шарошковому долоті під час проходження в породах з міцністю в межах 10–13 одиниць за шкалою проф. М.М. Протодьяконова і м'які механічні характеристики – в більш міцних породах. Під час буріння перемержованих за фізико-механічними властивостями гірських порід спосіб керування забезпечує автоматичний вибір механічних характеристик залежно від міцності породи.*

**Ключові слова:** буровий верстат, привод обертання, привод подачі, спосіб керування.

The SBSH-250N and SBSH-250/270-32 drilling rigs created by OJSC NKMZ are equipped with two adjustable rotation systems for uphill and downhill operation, which use modern digital AC and DC drives. Such electromechanical systems are fully controllable and expand the possibilities of automating the drilling process, allowing to take into account the technological features of the drilling rigs, which was impossible to achieve when using non-adjustable drives for the feed drilling rod in the SBSH-250MN-32 machines [1; 2].

An essential issue in the development of a control system for rotary and feed drives is the choice of control method. Control methods are known that maintain one of the following parameters at a constant level: rotational speed of the bit, torque on the bit, linear speed of the bit, axial pressure on the bit, and power consumed by the rotary drive. Based on the energy criterion of bit stability, let's choose a rational way to control the rotary drive of the rotary rod of a ball drilling rig.

The operation of a drilling rig is characterized by the conversion of electromagnetic energy coming from the power supply system into mechanical energy, which is released in the form of unproductive losses and converted into useful work used to destroy rock and transport drill cuttings to the wellhead [3; 4]. Energy flows are formed and directed through the following channels: axial force – the power of linear movement of the bit; rotation frequency – the power of rock destruction; compressed air pressure and flow rate – the power of drill cuttings (mud) removal. Each channel has an individual energy type converter, including: an adjustable electro-hydro-mechanical drive for feeding the drill bit; an adjustable electromechanical drive for rotating the roller cutter bit; an unregulated electromechanical drive for the compressor to remove drill cuttings from the surface of the bottom-hole face [5].

The energy flows are directed to the surface of the bottom hole, with the axial force tending to crush the surface, creating a stress state in the rock mass; the rotational energy is used to penetrate the pins into the surface layer of the bottom hole, destroy the rock and crush it, which is then carried to the wellhead by the air flow.

The drilling process is carried out in two mutually exclusive directions: the largest number of drilled wells in the shortest operating time; the lowest wear of drilling tools (rods and bits) during drilling.

The most worn parts of a roller cutter bit are its tooling and supports. During operation, the bit is subjected to high static and dynamic loads, as well

as intense fatigue and abrasive wear. The flow of rotational energy is aimed not only at destroying the rock, but also at destroying the bit itself.

The pins of the roller cutter are subjected to a cyclic impact load, which leads to the accumulation of fracture energy from fatigue of the tooling material and bit supports. Penetration of the pin into the rock layer occurs upon impact, and the stored kinetic energy of the rotation of the bit is converted into potential fracture energy of the rock. A stress state is created on the face with subsequent destruction of its surface layer. As the rock strength increases, the potential energy increases, while maintaining the intensity of the fracture process at a constant level. At the same time, there is a significant wear of the bit, as its destruction due to fatigue of the grit material increases.

The durability of the bit's drill bit material depends on the overcome torque, the current rotational speed of the bit and the power generated in the area of contact between the bit and the rock face, which can change its strength according to an unknown law. In the case of uneven power generation in the face zone, the load is unevenly distributed over the surface of the roller, which causes the appearance of zones with different stresses. This results in uneven wear of the tooling and bit supports and a decrease in its service life, which negatively affects the bit penetration in general.

The following criteria for determining bit durability are proposed: penetration per bit, bit service life, conditional bit wear [6].

The criterion of the durability of a roller cone bit, which objectively controls the current mode of operation (wear), should take into account both the strength of the rock and the duration of the bit in contact with the massif, which has a changing strength and abrasiveness. The strength and abrasiveness of the rock can be objectively assessed by the value of the moment of resistance on the roller (with increasing strength and abrasiveness of the rock, the moment of resistance increases, and the wear of the tooling and bit supports increases at the same time). The amount of bit wear can be estimated by the angle of rotation of the bit at the current moment of resistance, i.e. as [7]:

$$dW = M_c(\alpha) \cdot d\alpha,$$

where  $dW$  – power differential, which characterizes the wear of the bit;  $M_c(\alpha)$  – the current torque of the resistant on the roller;  $d\alpha$  – differential angle of rotation of the bit.

Complete wear of the tooling and bit supports, according to the proposed bit stability criterion, is defined as:

$$W = \int_0^{\alpha_K} M_c(\alpha) d\alpha,$$

where  $\alpha_K$  – bit rotation angle due to full (permissible) wear of the tooling and supports.

Moreover, with an increase in rock strength (resistance torque), the allowable angle of rotation decreases and, conversely, increases when the roller cutter is used in less strong rocks. The dependence of the permissible angle of rotation on the moment of resistance with a limited bit service life is hyperbolic.

To move from the permissible angle of rotation  $\alpha_K$  of the bit to its service life  $T_K$ , we use the integral dependence of the form:

$$W = \int_0^{\alpha_K} M_c(\alpha) \frac{d\alpha}{dt} dt = \int_0^{T_K} M_c(t) \omega \cdot dt,$$

where  $t, dt$  – current time and its differential;  $\omega$  – roller-cone bit rotation speed;  $T_K$  – time corresponding to the maximum wear of the roller cutter bit.

Consider that the product of the torque and rotational speed is the power of rock destruction by the bit  $P(t)$ , and the integral of the current power over time is the energy  $E$ , then:

$$W = \int_0^{T_K} M_c(t) \omega \cdot dt = \int_0^{T_K} P(t) dt = E,$$

thus, the allowable wear of the bit is uniquely determined by the amount of energy that the roller converts during drilling in the bottom hole zone. The more energy is spent on drilling in the bottom hole zone, the greater the bit wear.

Then we have that to determine the uniform wear of the bit during in time, it is necessary that the energy flow generated through the channel of the rotation speed of the bit – the rock fracture power, grows linearly as a function of time, i.e. the rate of energy consumption through this channel should be constant. Therefore, to maintain the dependence of the fracture rate on material fatigue at a constant level, the rate of energy input into the face zone should be regulated. It is necessary to change the rotational speed of the bit in inverse proportion to the moment of resistance on the bit. This is possible only by maintaining a constant level of power coming through the rotational speed – rock destruction power channel.

The characteristics of rotary and feed drives should be adjusted in accordance with the strength of the rocks [8]. Therefore, the technological parameters of drilling should change according to the following dependencies: when the strength of the drilled rock increases, the axial pressure on the tool increases, its rotation frequency decreases,

which will lead to a decrease in the linear rate of drilling a borehole, i.e.:

$$G = G_0 + a \cdot f; n = n_0 + b / f; V_M = V_0 + c / f,$$

where  $G, n, V_M, G_0, n_0, V_0$  – current and initial axial force, rotational speed and mechanical drilling speed;  $a, b, c$  – constant coefficients that depend on the characteristics of the rocks being drilled, the type of bit, etc.;  $f$  – strength of the rock being drilled, according to the Protodeacon's scale.

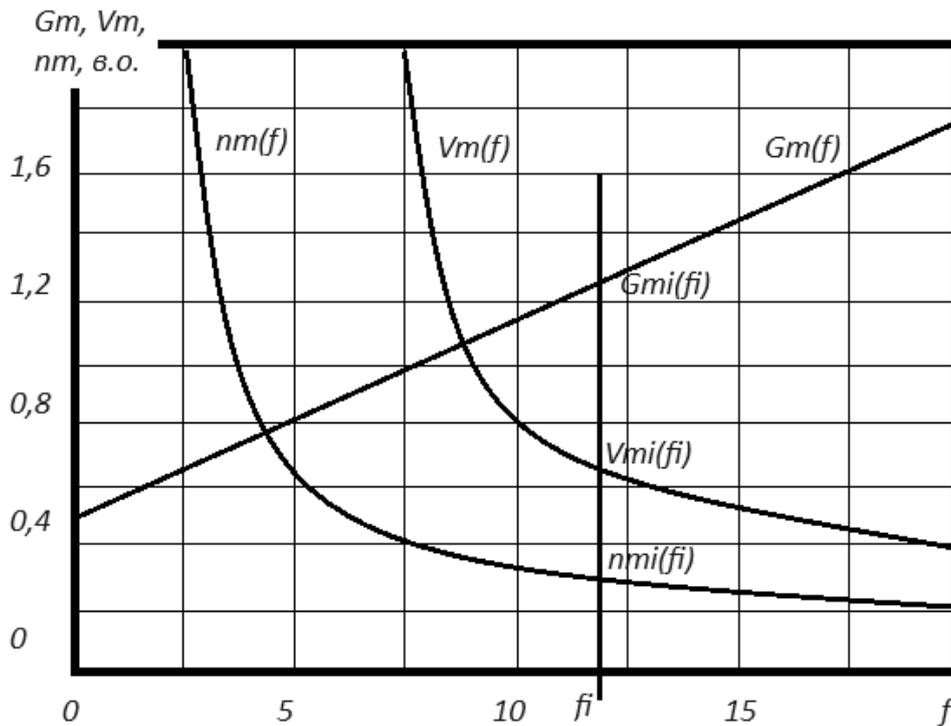
The graphical interpretation of the above equations is in the form of dependencies (Fig. 1), which define the control law when drilling rocks of varying strength: the stronger the rock, the lower the rotational speed of the roller cutter bit and the greater the axial force on the bit. This algorithm is implemented by the operator in the manual control mode. The strength of the rock cannot be measured directly, so the driller estimates it by the moment of resistance on the roller cutter. Drilling is based on averaged data, as the operator is not able to process the current values of rock strength changes.

The proposed method of controlling the drive systems for feeding and rotation is based on the task of increasing bit stability by improving the method of controlling the drilling process by forming “hard” mechanical characteristics of the rotation drive when drilling in soft and fractured rocks and “soft” mechanical characteristics when drilling in strong unbroken rocks [9]. When drilling rocks that vary in physical and mechanical properties, automatic switching from one drive system operation mode to another allows to increase bit stability.

This task is solved by distributing the operating modes of the drilling rigs drive systems in accordance with the strength of the rock being destroyed, which ensures a rational load on the roller-cone bit.

In addition, the drilling process control method considers the possibility of limiting the appearing vibration vibrations of the drill bit, which excite self-oscillations in the electromechanical system. If the natural and forced frequencies coincide, emergency resonance phenomena occur in the machine. With an increase in the power consumed for rock destruction, at a constant fracture resistance torque, the rotational frequency of the tool and its vibration oscillations increase. Therefore, in the proposed control method, vibration oscillations are limited by influencing the set fracture power: with an increase in vibration oscillations, the power consumed for rock fracture should decrease.

Drilling hard, intact fractured rocks is due with significant peak drag moments on the bit. The value of the drag torque can exceed the maximum possible value of the rotary drive torque, which leads to the bit “sticking” on the bottom hole. Since the



**Fig. 1. Static mechanical characteristic realized on the bit ( $n_m$  – bit rotation frequency,  $V_m$  – linear velocity of the bit,  $G_m$  – axial force on the bit,  $f$  – rock strength factor)**

drag torque depends on the axial pressure, if it is exceeded during drilling, the setpoint limit should be reduced to an acceptable value by adjusting the bit pressure. The lower the bit pressure, the lower the resistance torque.

If the current power value required to fracture the rock is less than the set value, then drilling is carried out in non-energy-intensive rocks, such as fractured or soft rocks. In this case, it is rational to drill in the mode that maintains a constant rotational speed and adjust the pressure on the bit. In this drilling mode, the linear speed of the bit should be limited to eliminate dynamic impacts of the bits when passing through rock with higher strength.

As the bit moves into stronger or undisturbed rock, the power required to drill in the rock mass increases. Therefore, in order to maintain greater durability of the bit equipment, it is necessary to switch to the drilling mode with constant pressure on the bit and adjust its rotation speed. To improve the bit operating conditions in this control mode, it is necessary to maintain a constant power flow in the bottom hole zone, i.e., with an increase in the moment of resistance on the bit, its rotation speed should be reduced accordingly.

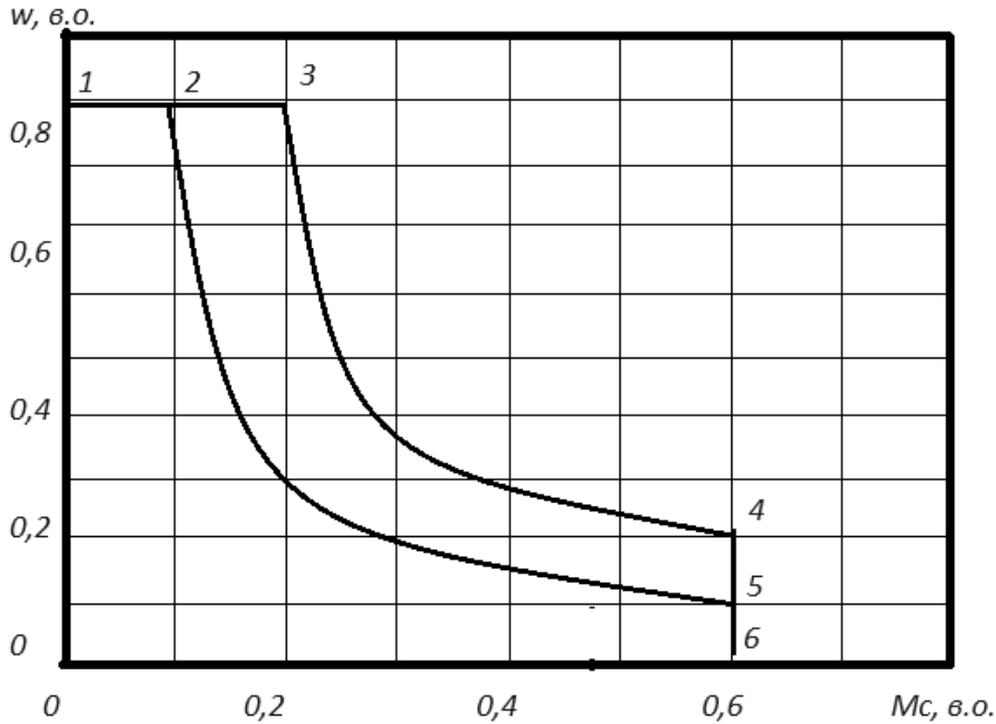
Fig. 2 shows the static mechanical characteristic realized on the bit with this method of controlling the drive systems for feeding and rotating the posture ( $\omega$  – bit rotation speed,  $M_c$  – resistance moment).

When drilling with a bit in fractured or soft (non-energy-intensive) rocks, low fracture power is required. In this mode of drilling, it is rational to limit the bit speed to the maximum specified level and control the axial force on the bit so that the linear speed of the bit does not exceed the maximum specified value (section 1–3 in the mechanical characteristic). As the axial pressure increases, the power required to fracture the rock and the static torque on the bit increase.

As the bit moves into undisturbed, hard rock, the power consumed by the rotary drive increases, meaning that drilling is performed in energy-intensive rocks. In this case, the drilling rig's productivity is limited by its power capacity. The drilling rig moves to the mechanical characteristic 3–4 (Fig. 2), where the rig's energy resources are controlled to maintain a constant power flow required to fracture the rock. In this mode of drilling, as the strength of the drilled rock increases, the static moment of resistance on the bit increases and its rotation speed decreases.

The linear speed of the bit movement will be unstable and depends on the physical and mechanical properties of the drilled rock. In the section of the mechanical characteristic 3–4, the axial pressure on the bit is maintained constant.

On the section of mechanical characteristics 4–6, the following parameters are kept constant: static torque, rock fracture power flow. The



**Fig. 2. Static mechanical characteristic of the drive system realized by the proposed method of controlling the drive systems for feeding and rotating the bit ( $\omega$  – bit rotation frequency,  $M_c$  – resistance moment)**

elimination of vibration vibrations during drilling is achieved by reducing the set fracture power. The static characteristics for the mode of operation with reduced fracture power in Fig. 2 are shown by the section 1–2–5–6.

Thus, based on using the energy criterion of bit stability, it can be concluded that the bit will have the greatest stability under a uniform energy load, i.e., when maintaining a linear increase in the energy of rock destruction or when maintaining a constant level of power released in the bit-head contact zone. The considered bit performance criterion summarizes the previously proposed criteria (bit penetration, bit service life, conditional bit wear), since it automatically takes into account the strength and abrasiveness of the rock being destroyed by the bit.

As a result of the analysis of the state of the roller cutter method of blast drilling and theoretical and experimental studies of ways to improve the drive systems of the drilling rig.

1) Currently, one of the main problems of open-pit mining in Ukraine is the physical and moral obsolescence of mining equipment, including drilling rigs. Therefore, modernization of the existing fleet and creation of a new generation of drilling rigs is an important scientific and applied problem, the successful solution of which determines the competitiveness of domestic mining production in the global market.

2) The teams of special design bureaus of the institutes of OJSC Novo-Kramatorsk Machine-Building Plant (Kramatorsk), OJSC KryvorizhNIPIrudmash, OJSC Kryvyi Rih Mining Engineering Plant (Kryvyi Rih) are engaged in the development of domestic ball drilling machines, which improve the mechanical and hydraulic equipment of the drilling rigs, but continue to use traditional thyristor drive systems with DC motors.

3) Along with the improvement of the hydromechanical equipment of the drilling rig, it is necessary to improve the drive systems, which must be in line with the level achieved in the global electrical industry. Only then can a competitive drilling rig be created.

4) In order to increase the stability of the roller cutter bit by maintaining the power flow in the bottom hole zone, a drilling process control method with control of the drives of the mechanisms of downhole operations, feeding and rotation was developed, which forms hard mechanical characteristics on the roller cutter bit when drilling in rocks with strength  $f \leq 10-13$  according to the scale of Prof. M.M. Protodyakonov and soft mechanical characteristics in stronger rocks. When drilling intermixed rocks with different physical and mechanical properties, the control method provides automatic selection of mechanical characteristics depending on the rock strength.

#### LITERATURE:

1. Хілов В. Удосконалювання приводних систем бурових верстатів для кар'єрів Кривбасу. *Науково-технічний збірник: Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2003. Вип. 71. С. 121–127.
2. Бешта О., Хілов В. Використання керованих приводів у бурових верстатах нового покоління для кар'єрів України. *Електроінформ*. 2004. С. 22–23.
3. Бешта О., Хілов В. Підвищення рівня енерговикористання у гірничодобувній галузі засобами регульованого електроприводу. *Науковий вісник НГУ*. 2005. № 2. С. 54–56.
4. Khilov V. Application of computer-aided drives in new generation boring rigs for open pit's in Ukraine. *Науковий вісник НГУ*. 2006. № 5. С. 72–76.
5. Бешта О., Хілов В. Застосування ресурсо- та енергозберігаючих приводних систем змінного струму в бурових верстатах нового покоління. *Наука та інновації*. 2006. Т. 2. № 3. С. 38–43.
6. Pivnyak G., Beshta A., Khilov V. AC drive system for actuator's power control. *XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'05*. 2005. P. 368–370.
7. Бешта О., Хілов В. Приводна система для контролювання потужності на шарошковому долоті. *Вісник КДПУ*. 2005. Вип. 4 (33). С. 85–88.
8. Півняк Г., Бешта О., Хілов В. Принципи побудови системи керування електроприводом обертання ставку верстата шарошечного буріння. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2003. № 10. Т. 1. С. 141–143.
9. Хілов В. Пат. 61548, Україна, МКИ Е21В45/00. Спосіб керування процесом буріння. *Бюлетень державної системи правової охорони інтелектуальної власності*. 2003. № 11.

#### REFERENCES:

1. Khilov, V. (2003). Udoskonaliuvannya pryvodnykh system burovykh verstativ dlia karieriv Kryvbasu [Improvement of drive systems of drilling rigs for Kryvbass quarries]. *Scientific and technical coll.: Mining electromechanics and automation*. Vol. 71, pp. 121–127. [in Ukrainian]
2. Beshta, O. & Khilov, V (2004). Vykorystannia kerovanykh pryvodiv u burovykh verstatakh novoho pokolinnia dlia karieriv Ukrainy [The use of controlled drives in drilling machines of the new generation for the quarries of Ukraine]. *Elektroinform*, p. 22–23. [in Ukrainian]
3. Beshta, O. & Khilov, V (2005). Pidvyshchennia rivnia enerhovykorystannia u hirnychodobuvnyi haluzi zasobamy rehulovanoho elektropryvodu [Increasing the level of energy use in the mining industry by means of an adjustable electric drive]. *Science NGU Herald*, № 2, pp. 54–56. [in Ukrainian]
4. Khilov, V. (2006). Application of computer-aided drives in new generation boring rigs for open pits in Ukraine. *Science NGU Herald*, № 5, pp. 72–76.
5. Beshta, O. & Khilov, V (2006). Zastosuvannia resurso- ta enerhozberihaiuchykh pryvodnykh system zminnoho strumu v burovykh verstatakh novoho pokolinnia [Application of resource- and energy-saving AC drive systems in new generation drilling machines]. *Science and innovation*. Vol. 2, № 3, pp. 38–43. [in Ukrainian]
6. Pivnyak, G. & Beshta, A. & Khilov, V. (2005). AC drive system for actuator's power control. XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'05, pp. 368–370.
7. Beshta, O. & Khilov, V (2005). Pryvodna systema dlia kontroliuvannia potuzhnosti na sharoshkovomu doloti [Drive system for power control on a square bit]. *Herald of KDPU*. Issue 4 (33), pp. 85–88. [in Ukrainian]
8. Pivniak, G. & Beshta, O. & Khilov, V. (2003). Pryntsyipy pobudovy systemy keruvannia elektropryvodom obertannia stavu verstata sharoshechnoho burinnia [Principles of construction of the control system of the electric drive of rotation of the shaft of the rotary drilling machine]. *Bulletin of NTU "KhPI"*, № 10, t. 1, pp. 141–143. [in Ukrainian]
9. Khilov, V. (2003). Pat. 61548, Ukraine, MKY E21V45/00. "Sposib keruvannia protsesom burinnia" [Pat. 61548, Ukraine, MKY E21B45/00. "The method of controlling the drilling process"]. *Bulletin of the state system of legal protection of intellectual property*, № 11. [in Ukrainian]

## ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 639.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-11>

### ТЕХНОЛОГІЯ СУМІСНОГО ВИРОЩУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ АКВАКУЛЬТУРИ В УМОВАХ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВОДИ

**Єсіпова Наталія Борисівна,**

кандидат біологічних наук, доцент,

доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-1924-2547

**Шарамок Тетяна Сергіївна,**

кандидат сільськогосподарських наук, доцент,

завідувачка кафедри загальної біології та водних біоресурсів

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ORCID ID: 0000-0003-3523-5283

*Масштабне забруднення поверхневих вод техногенними і побутовими стоками робить їх непридатними для рибогосподарського використання. Одним зі шляхів вирішення проблеми отримання якісної продукції аквакультури може бути використання установок із замкнутим водопостачанням (УЗВ). Стаття містить розроблену авторами технологію сумісного вирощування нільської тилляпії *Oreochromis niloticus* і гігантської прісноводної креветки *Macrobrachium rosenbergii* в системі рециркуляційного водоспоживання з продуктивністю 30 тонн тилляпії і 2 тонни прісноводної креветки на рік. Два запропонованих об'єкта аквакультури мають однаковий діапазон оптимальних температур: 26–28°C і однаковий термін циклу вирощування від личинки до товарної маси – близько 180 днів. Після цього можна заповнити систему новими партіями. Таким чином, за рік можна отримувати двічі товарну продукцію. У статті надаються розрахунки кількості плідників нільської тилляпії і постличинок прісноводної креветки, необхідних для отримання запланованої товарної продукції. Наводяться схема розташування структурних компонентів УЗВ, розрахунки кількості басейнів для вирощування молоді і товарних особин тилляпії та креветок. Календарний графік містить докладний перелік технологічних процесів із зазначенням їх тривалості, частоти проведення і строків виконання. У запропонованій технології сумісного вирощування нільської тилляпії і прісноводної креветки в УЗВ загальні витрати на використання води і електроенергії будуть компенсуватись реалізацією вартісної продукції креветок і менш вартісної та доступної для населення продукції тилляпії, при цьому обидва об'єкти мають високі смакові і поживні якості та невибагливі до умов утримання. Технологія дає змогу отримувати рибопосадковий матеріал тилляпії, який можна використовувати для зариблення техногенних водойм задля очищення їх від надмірного розвитку водної рослинності.*

**Ключові слова:** установка з рециркуляцією води, нільська тилляпія, гігантська прісноводна креветка, технологія вирощування, товарна продукція.

#### **Yesipova Nataliia, Sharamok Tetiana. Technology of co-cultivation of aquaculture objects in the conditions of water recirculation**

Large-scale pollution of surface waters by technogenic and domestic effluents makes them unsuitable for fish farming use. The usage of installations with a closed water supply (CWS) could be one of the ways to solve the problem of obtaining high-quality aquaculture products. This paper describes the technology developed by the authors for the co-cultivation of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* and giant freshwater shrimp *Macrobrachium rosenbergii* in a recirculating water consumption system with a productivity of 30 tons of tilapia and 2 tons of freshwater shrimp per year. The two proposed aquaculture facilities have the same range of optimal temperatures: 26–28°C and the same term of the growing cycle from larvae to marketable mass – about 180 days. After that, you can fill the system with new batches. Thus, it is possible to receive commercial products twice a year. The paper provides calculations of the number of Nile tilapia broodstock and freshwater shrimp postlarvae required to obtain the planned marketable products. The layout of the structural components of the CWS, and calculations of the number of pools for growing fingerlings and commercial individuals of tilapia and shrimp are given. The calendar schedule contains a detailed list of technological processes with an indication of their duration and frequency. In the proposed technology for the joint cultivation of Nile tilapia and freshwater shrimp in CWS, the total costs of water and electricity use will be compensated by the sale of expensive shrimp products and less expensive and affordable tilapia products

to the population, while both objects have high taste and nutritional qualities and are undemanding to conditions of maintenance. The technology makes it possible to obtain tilapia fish planting material, which can be used for stocking man-made reservoirs to clean them from the excessive development of aquatic vegetation.

**Key words:** plant with water recirculation, Nile tilapia, giant freshwater shrimp, cultivation technology, commercial product.

**Вступ.** Перші системи з рециркуляційною водою почали масово використовувати у середині ХХ століття у США для відновлення числа популяції форелі. Пізніше цей досвід був використаний для інших видів риб – осетрових, лососевих, сомів, вугрів. У країнах Європи стрімкий розвиток індустріальної аквакультури з використанням установок із замкнутим водопостачанням (УЗВ) був пов'язаний насамперед із суворими екологічними обмеженнями, які були спрямовані на мінімізацію забруднень природних вод від рибоводних заводів та ставкових господарств [1].

Досвід використання УЗВ для вирощування риби та інших гідробіонтів показав цілу низку переваг перед класичними технологіями, які застосовуються в аквакультурі. Крім зменшення антропогенного навантаження на довкілля і раціонального використання водних ресурсів, УЗВ передбачає повний контроль і керуваність технологічними процесами [2]. Підтримання завдяки терморегуляторам оптимального температурного режиму дає змогу майже вдвічі скоротити термін товарного вирощування гідробіонтів в УЗВ і гарантує їм безпеку від стресових коливань температури, пов'язаних з кліматичними змінами [3; 4].

Великою перевагою УЗВ перед традиційними технологіями є економія прісної води завдяки багатократному її використанню. Особливо це стосується засушливих регіонів, де відзначено її дефіцит. Водопостачання УЗВ відбувається разовим заповненням резервуарів з артезіанського джерела з подальшим підживленням свіжою водою. Такий спосіб дає змогу в багато разів зменшити витрати води на одиницю вирощеної продукції і знизити її собівартість. Крім того, риба має високий ступінь захисту від токсичного забруднення, патогенних бактерій та паразитів [5; 6].

Виробників також приваблює компактне розташування УЗВ на невеликій площі. Це дає змогу не тільки економити земельні ресурси, але й будувати рециркуляційну систему в межах великих міст, де буде забезпечено постійний попит на товарну продукцію і мінімізовано транспортні витрати.

Незважаючи на суттєву економію води і простору, збільшення продуктивності виробничих площ та інших переваг УЗВ, собівартість

об'єктів аквакультури, вирощених в таких умовах, залишається значно вище порівняно зі ставковим або садковим вирощуванням [2]. Тому сьогодні економічно вигідним є застосування УЗВ для товарного вирощування цінних гідробіонтів (осетрові, лососеві, креветки). Досвід УЗВ-господарств в Україні свідчить про те, що ефективність вирощування стерляді та ленського осетра майже вдвічі перевищує показники вирощування цих риб за класичними ставковими технологіями [7].

Проте слід враховувати, що осетрові риби є, хоча й цінним, але вартісним об'єктом аквакультури, недоступним більшості верств населення нашої країни. Збалансувати соціальні і економічні потреби можна шляхом раціонального підбору об'єктів аквакультури для сумісного вирощування в УЗВ. Такими об'єктами, на нашу думку, можуть бути нільська тилapia *Oreochromis niloticus* і прісноводна креветка *Macrobrachium rosenbergii*. Тилapia здавна є популярним об'єктом аквакультури в Південній Кореї. Там вона вирощується переважно в рециркуляційній системі [8]. В Ізраїлі продукція тилapiї досягає близько 40% від загальної рибопродукції. В УЗВ за 4–6 місяців там отримують понад 100 кг/м<sup>3</sup> товарної тилapiї [9].

Стрімке зростання популярності тилapiї як об'єкта індустріального вирощування пов'язане, по-перше, з її високими смаковими якостями, по-друге, зі швидким темпом росту і невибагливістю до кормів та якості води. Для забезпечення високого темпу росту риб температура води має бути не менше 25°C. Особливості біології, а саме виношування самками заплідненої ікри у роті і подальша турбота про потомство, забезпечують майже 95% виживання молоді [10].

Прісноводна креветка *Macrobrachium rosenbergii*, або гігантська (королівська) прісноводна креветка, користується високим ринковим попитом у світі. В країнах Південно-Східної Азії і Близького Сходу вона є традиційним об'єктом прісноводної аквакультури [11]. Серед країн – постачальників прісноводної креветки на світовий ринок лідирує Китай зі щорічним обсягом виробництва понад 130 тис. тонн [12]. В Україні прісноводна креветка є новим і поки ще екзотичним об'єктом прісноводної аквакультури. Досвід вирощування товарної креветки

в ставках півдня України показав, що вона невибаглива до умов, за температури води 26–28°C швидко набирала товарну масу, яка в середньому складала 30 г, а у деяких екземплярів 80–120 г [13]. Повідомлень про результати вирощування прісноводної креветки в Україні в умовах УЗВ у науковій літературі ми не знайшли.

Метою роботи є розроблення технології сумісного вирощування в рециркуляційній системі нільської тилляпії і прісноводної креветки для отримання товарної продукції, яка б відповідала економічним і соціальним вимогам.

**Матеріали і методи.** Добір об'єктів аквакультури для вирощування в УЗВ проводився за такими принципами: однакові вимоги до водного середовища (оптимальна температура, мінералізація, рН); можливість поліциклічного (цілорічного) вирощування; можливість зменшення кормових витрат за рахунок використання відходів виробництва; відсутність однакових збудників паразитарних та інфекційних хвороб. Таким вимогам відповідали нільська тилляпія *Oreochromis niloticus* і прісноводна креветка *Macrobrachium rosenbergii*. Два вибрані об'єкти мають однаковий діапазон оптимальних температур: 26–28°C і однаковий термін циклу вирощування від личинки до товарної маси, який становить близько 180 діб [10; 16].

Для розроблення технології сумісного вирощування нільської тилляпії і прісноводної креветки в УЗВ використовувались відповідні рибоводні методики, нормативні та експериментально отримані рибоводно-біологічні показники [10; 14–19]. Проводились розрахунки кількості ремонтно-маточного стада і молоді тилляпії та кількості постличинки креветки, необхідних для отримання товарної продукції; визначення кількості басейнів для вирощування молоді і товарних особин, а також об'ємів води для їх заповнення; визначення загальної кількості корму, яку потрібно згодувати вирощувальним об'єктам.

Створення схеми проєктної рециркуляційної системи для сумісного вирощування нільської тилляпії і прісноводної креветки базувалось на класичній схемі УЗВ, яка передбачає у своїй структурі наявність таких обов'язкових компонентів: рибоводні басейни, обладнання для механічної і біологічної фільтрації води, басейн-накопичувач, електричні нагрівачі та насосна установка [1].

**Результати.** Світовий досвід використання УЗВ свідчить про те, що найбільш економічно виправдані рибні господарства із середньою продуктивною потужністю 30–50 тонн на рік.

У нашому варіанті планується вирощування 30 тонн тилляпії і 2 тонн прісноводної креветки на рік.

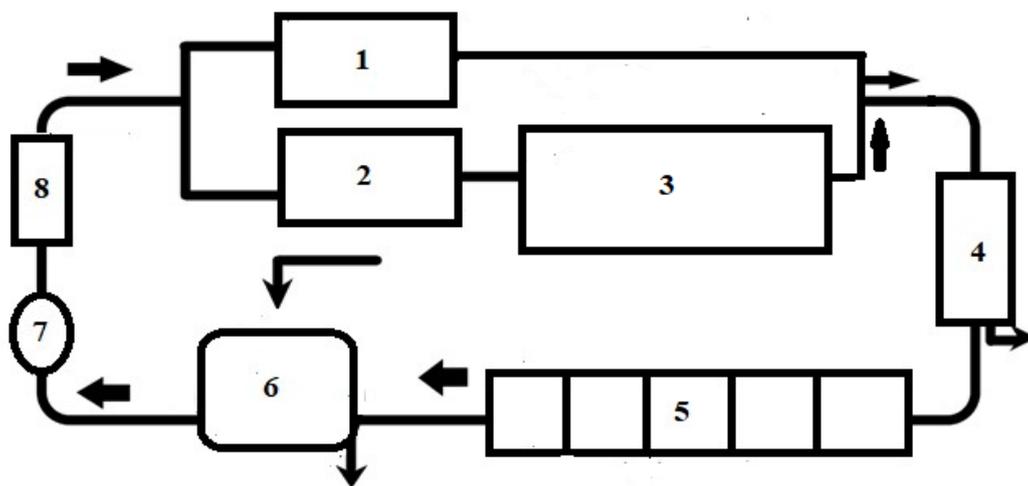
Запропонована технологія сумісного вирощування риб і креветок в УЗВ передбачає повний цикл для тилляпії (посадка плідників на нерест, отримання і підросування личинок, вирощування товарної риби) і неповний цикл для прісноводної креветки (від стадії постличинки до товарної маси).

Відомо, що у прісноводної креветки *Macrobrachium rosenbergii* вирощування початкових личинкових стадій має відбуватись у воді із солоністю 12 ‰, а подальше вирощування – у прісній воді [17]. Задля зменшення ризиків втрати значної кількості креветок через вразливість личинкових стадій, зменшення площі робочого приміщення, запобігання створенню додаткової системи басейнів із солоною водою, а також скорочення витрат на електроенергію планується посадка в УЗВ вже підрослених до стадії постличинки креветок у віці 2,5–3 місяців. Постличинки можна закупати у виробників, які займаються марікультурою і спеціалізуються на вирощуванні молоді креветок.

Схема УЗВ для сумісного вирощування тилляпії і креветки представлена на рис. 1 і містить басейни для утримання ремонтно-маточного стада риб і підросування личинок з індивідуальною водоподачою і водоскидом у кожному басейні (1), басейни для вирощування товарних креветок (2), басейни для вирощування товарних тилляпій (3), фільтр для механічної фільтрації води і видалення органічних зависей (4), секції біофільтрів для біологічної очистки води від розчинених органічних речовин (5), басейн-накопичувач для забезпечення живлення насосу, видалення надлишку води в системі через перелив і підживлення свіжою водою (6), водяний насос (7), теплообмінник для підтримання оптимальної температури в системі (8).

Тилляпія невибаглива до вмісту кисню і є активним споживачем детриту. Тому ми пропонуємо в циркуляційній системі спочатку розташувати басейни з креветками, а за ними – басейни з тилляпією. Залишки корму, панцирів від линьки креветок та іншої органіки, що будуть скидатись із басейнів з креветками, стануть додатковим кормом для тилляпії. Встановлено, що поїдання детриту дає тилляпії додатково 10% приросту маси [10]. Це дасть змогу зменшити кормові витрати.

Результати розрахунків кількості плідників і молоді тилляпії, а також постличинки прісноводної креветки, необхідних для отримання запланованої товарної продукції, представлені в табл. 1.



**Рис. 1. Схема рециркуляційної системи для сумісного вирощування нільської теляпії і прісноводної креветки**

Примітка: 1 – басейни з ремонтно-маточним стадом і личинками теляпії; 2 – басейни з креветками; 3 – басейни із товарною теляпєю; 4 – механічний фільтр; 5 – біологічний фільтр; 6 – басейн-накопичувач; 7 – водяний насос; 8 – теплообмінник

Таблиця 1

**Технологічні показники сумісного вирощування нільської теляпії і прісноводної креветки в рециркуляційній системі**

| Показники   | Значення показників       |
|---|---------------------------|
| <b>Нільська теляпія</b>   |                           |
| Запланована товарна продукція, кг   | 30000                     |
| Середня маса товарних риб, г  | 300                       |
| Вживання товарних риб від підрощеної молоді, %                                    | 90                        |
| Кількість молоді підрощеної до 10 г, екз.   | 111000                    |
| Вживання підрощеної молоді від личинок, %   | 85                        |
| Кількість личинок масою до 100 мг, екз.   | 130700                    |
| Середня плодючість самки, ікринок   | 1000                      |
| Кратність нересту за рік, разів   | 8                         |
| Співвідношення самців і самок   | 1:2                       |
| Загальна кількість плідників з урахуванням 50% резерву, екз.                      | 36 (12 самців і 24 самки) |
| Загальна кількість ремонтного стада, що складає 50% від кількості плідників, екз. | 18                        |
| Загальна кількість ремонтно-маточного стада, екз.                                 | 54                        |
| <b>Прісноводна креветка</b>   |                           |
| Запланована товарна продукція, кг   | 2000                      |
| Середня маса товарних креветок, г   | 100                       |
| Вживання товарних креветок від постличинок, %                                     | 85                        |
| Кількість постличинок, екз.   | 23500                     |

Виходячи з визначеної кількості плідників і посадкового матеріалу риб і креветок, проведено розрахунки кількості рибоводних басейнів. Для утримання ремонтно-маточного стада теляпії і проведення нересту необхідні прямокутні басейни об'ємом 5 м<sup>3</sup> у кількості 2 шт. з урахуванням щільності посадки 50–60 екз./м<sup>3</sup>, а також окремого утримання самців і самок після нересту. Для підрощування личинок теляпії до маси 100 мг з щільністю посадки 25 тис./м<sup>3</sup>

необхідні прямокутні басейни об'ємом 3 м<sup>3</sup> у кількості 2 шт. Кількість басейнів для підрощування личинок теляпії до маси 10 г з щільністю посадки 5 тис./м<sup>3</sup> становить 5 шт. за об'єму кожного басейну 5 м<sup>3</sup>. Для вирощування товарної теляпії до маси 300 г з щільністю посадки 500 екз./м<sup>3</sup> необхідні прямокутні басейни об'ємом 10 м<sup>3</sup> у кількості 20 шт. З урахуванням кратності нересту та тривалості вирощування (180 діб) протягом року басейни можна використовувати

повторно, тому їх кількість може бути скорочена до 10.

Для вирощування товарної креветки за щільності посадки 250 екз./м<sup>2</sup> можна використовувати прямокутні басейни площею 10 м<sup>2</sup> у кількості 10 шт.

Таким чином, для вирощування 30 тонн тилапії і 2 тонн креветки в рециркуляційній системі необхідний об'єм води для заповнення

басейнів буде складати 241 м<sup>3</sup>. При цьому бажано щомісячне підживлення у систему 10% свіжої води, що буде становити 24 м<sup>3</sup> у місяць або 288 м<sup>3</sup> на рік.

Технологія сумісного вирощування тилапії і креветки ділиться на етапи, які мають свої особливості (табл. 2).

Процес вирощування нільської тилапії складається з трьох етапів. На першому етапі

Таблиця 2

**Графік технологічних процесів за сумісного вирощування тилапії і прісноводної креветки в рециркуляційній системі**

| Назва технологічного процесу                        | Тривалість і частота проведення   |
|---|---|
| <b>Технологія вирощування нільської тилапії</b>     |   |
| I етап. Підготовка плідників і проведення нересту   | 20–22 діб,<br>8 разів/рік   |
| 1.1 Підготовка плідників:<br>– бонітування і відбір | 8 разів/рік   |
| – частота годівлі                                   | 1 раз/добу  |
| – лікувально-профілактичні обробки                  | за необхідності   |
| – контроль якості води                              | щоденно: Т°С, рН, O <sub>2</sub> ;<br>щотижня: СО <sub>2</sub> , амонійний і нітритний азот, окислюваність  |
| 1.2. Нерест   | кожні півтора місяця,<br>8 разів/рік  |
| 1.3. Інкубація:<br>– ікри                           | 3–5 діб   |
| – личинок   | 10–14 діб   |
| – гідрохімічний контроль                            | щоденно: Т°С, рН, O <sub>2</sub>  |
| 1.4. Отримання личинок                              | через 20–22 доби після початку нересту  |
| II етап. Вирощування молоді                         | 75–80 діб   |
| 2.1. Підрощування личинок до 100 мг                 | 15–20 діб   |
| – частота годівлі                                   | 24–48 разів/добу  |
| 2.2. Вирощування молоді до 10 г                     | 60 діб  |
| – частота годівлі                                   | 12 разів/добу   |
| – лікувально-профілактичні обробки                  | за необхідності   |
| – контроль якості води                              | щоденно: Т°С, рН, O <sub>2</sub> ;<br>щотижня: СО <sub>2</sub> , амонійний і нітритний азот, окислюваність  |
| III етап. Товарне вирощування риби                  | 180 діб   |
| – частота годівлі                                   | 4–6 разів/добу  |
| – лікувально-профілактичні обробки                  | за необхідності   |
| – контроль якості води                              | щоденно: Т°С, рН, O <sub>2</sub> ;<br>щотижня: СО <sub>2</sub> , амонійний і нітритний азот, окислюваність  |
| <b>Прісноводна креветка</b>                         |   |
| I етап. Вирощування постличинки                     | 45–60 діб   |
| – частота годівлі                                   | 4–5 разів/добу  |
| – лікувально-профілактичні обробки                  | за необхідності   |
| – контроль якості води                              | щоденно: Т°С, рН, O <sub>2</sub> ;<br>щотижня: СО <sub>2</sub> , амонійний і нітритний азот, окислюваність;<br>щомісячно: загальне мікробне число |
| II етап. Товарне вирощування креветок               | 180 діб   |
| – частота годівлі                                   | 2 рази/добу   |
| – лікувально-профілактичні обробки                  | за необхідності   |
| – контроль якості води                              | щоденно: Т°С, рН, O <sub>2</sub> ;<br>щотижня: СО <sub>2</sub> , амонійний і нітритний азот, окислюваність;<br>щомісячно: загальне мікробне число |

відбуваються бонітирувальні роботи з підготовки плідників до нересту, проведення нересту і отримання личинок. Дозрівання плідників нільської тилляпії відбувається в середньому 8 разів на рік, що дає можливість багатократно використовувати їх у нересті. Частота годівлі ремонтно-маточного стада буде складати один раз на добу протягом всього року з розрахунку добової дози корму 3% від загальної маси риб [19], що складає 0,8 кг/добу. Загальна кількість корму, яка буде витрачена під час вирощування ремонтно-маточного стада, буде становити 288 кг. Перший етап триває 20–22 доби і закінчується отриманням личинок.

На другому етапі відбувається вирощування молоді тилляпії до маси 10 г. Тривалість цього етапу становить 60 діб [10]. На цьому етапі режим годівлі личинок буде змінюватись за ступенем їх росту. За підрощування до маси 100 мг личинок необхідно годувати кормом 24–48 разів на добу в кількості 20% від маси риби. В подальшому частота годівлі зменшується до 12 разів/добу. Добова витрата корму буде становити 2,6 кг.

Третій етап починається з вирощування молоді від 10 г до товарної маси 300 г. Тривалість цього етапу складає в середньому 180 діб. Годувати риб необхідно 4–6 разів/добу в кількості 3% від маси риби. Витрати корму будуть становити 33 кг/добу і 5940 кг за весь період товарного вирощування.

Технологія вирощування креветки складається з 2-х етапів. На першому етапі відбувається вирощування постличинки до маси 0,5 г протягом 45–60 днів. Перший тиждень добова доза корму складає 100% від загальної маси постличинок, потім поступово знижується до 30% [17]. Частота годівлі у перший тиждень становить 5 разів/добу, пізніше – 4 рази/добу. На цьому етапі добові витрати корму будуть змінюватись за ступенем росту молоді креветок від 12 до 18 кг. Загальні витрати корму за перший етап складуть орієнтовано 590 кг.

Однією з основних проблем під час вирощування креветок є канібалізм, який керується зменшенням щільності посадки постличинок. Рекомендується в перший тиждень вирощування створити щільність посадки постличинок в басейнах 5000 екз./м<sup>2</sup>, на другий тиждень – зменшити до 2000 шт./м<sup>2</sup>, на третій тиждень – зменшити до 500 шт./м<sup>2</sup> [17]. В цей період постличинки доволі часто линяють. Скинуті панцирі можуть бути додатковим кормом для товарної тилляпії.

Другий етап починається з товарного вирощування креветок. За запланованої

товарної маси 100 г етап триватиме до 180 днів. Щільність посадки креветок під час товарного вирощування зменшується від 75 до 45 екз./м<sup>2</sup>. Добовий раціон корму складає 5% від загальної маси креветок. Загальні витрати кормів під час вирощування товарної креветки до 100 г будуть становити орієнтовано 1080 кг.

Під час вирощування об'єктів аквакультури в УЗВ обов'язковим заходом є контроль за станом водного середовища. Щоденно контролюються показники води, які можна коригувати: температура, вміст кисню в басейнах і рН. Щотижня визначаються показники, які вказують на рівень органічного забруднення системи і ефективність роботи біофільтрів – амонійний і нітритний азот, окислюваність; щомісячно – загальне мікробне число.

Враховуючи високу щільність посадки риб і креветок у басейни, можливі спалахи інфекційних захворювань, викликаних масовим розмноженням патогенних бактерій, присутніх у водному середовищі (*Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Flexibacter* тощо). Для запобігання хвороб проводяться систематичні патологічні обстеження вирощувальних об'єктів і профілактичні обробки.

Таким чином, запропонована технологія сумісного вирощування нільської тилляпії і прісноводної креветки в рециркуляційній системі дасть змогу двічі на рік отримувати цінну товарну продукцію, враховуючи швидкий ріст об'єктів і однаковий діапазон оптимальних температур. Використання для товарного вирощування тилляпії скидної води з креветкових басейнів, збагаченої органічними залишками, забезпечить додатковий приріст товарної маси риб. Реалізація вартісної продукції креветок і менш вартісної продукції тилляпії сприятиме компенсації виробничих витрат і рішенню проблеми забезпечення населення якісною і доступною рибною продукцією. Тилляпія як активний споживач детриту, може використовуватись для зариблення техногенних водойм задля очищення підводних комунікацій від біобросовань.

**Висновки.** Технологія комплексного вирощування нільської тилляпії і прісноводної креветки базується на однакових вимогах об'єктів до температури і гідрохімічних показників, можливості поліциклічного (цілорічного) вирощування, відсутності однакових збудників інфекційних хвороб.

Особливістю запропонованої рециркуляційної системи є каскадне розташування басейнів з товарною тилляпією за басейнами з креветками,

що дає можливість збільшити приріст товарної маси тиліяпії за рахунок залишків органіки, яка надходить зі скидною водою з креветкових басейнів.

Для вирощування 30 тонн тиліяпії і 2 тонн креветки необхідно 2 басейни об'ємом 3 м<sup>3</sup> (для підрощування личинок), 7 басейнів об'ємом 5 м<sup>3</sup> (для ремонтно-маточного стада і підрощених личинок) і 20 басейнів об'ємом 10 м<sup>3</sup> (для вирощування товарної риби і товарної креветки). Загальний обсяг витраченої води в УЗВ буде становити 241 м<sup>3</sup> зі щомісячним підживленням у систему 10% свіжої води.

Технологія вирощування нільської тиліяпії має поліциклічний характер і складається з трьох етапів: проведення нерестової кампанії і отримання личинок, підрощування личинок до 10 г, вирощування риб до товарної маси 300 г. Термін товарного вирощування тиліяпії становить 180 діб, затрати кормів на цьому етапі – 5940 кг.

Технологія вирощування прісноводної креветки складається з 2-х етапів: вирощування постличинки до маси 5 г і вирощування товарної креветки до маси 100 г. Тривалість товарного вирощування креветки – 180 діб, витрати кормів – 1080 кг.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Брайнбалле Я. Посібник з аквакультури в установках замкнутого водопостачання. Введення в нові екологічні та високопродуктивні замкнуті рибоводні системи. Копенгаген, 2010. 70 с.
2. Гриневич Н., Хом'як О., Присяжнюк Н., Михальський О. Аналіз гідротехнологічної складової індустріальних акваферм за замкнутого водопостачання. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2019. № 2. С. 59–76.
3. Goddard S., Delghandi M. Recirculating Aquaculture Systems (RAS). *Encyclopedia of the World's Biomes*. 2020. № 4.
4. Kamermans P., Garcia A.B., Joaquim S., Matias D. Recirculation nursery systems for bivalves. *Aquaculture International*. 2016. № 24 (3).
5. Кононенко Р. Використання установки замкнутого водопостачання при інтенсифікації виробництва рибопродукції. *Рибогосподарська наука України*. 2013. № 2 (24). С. 56–65.
6. Єсіпова Н., Уджмаджурідзе В. Перспективи застосування рециркуляційних систем в аквакультурі. *Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку*: матеріали наук.-практич. Конференції, 27–28 жовтня 2022 року. Херсон – Кропивницький. С. 288–291.
7. Шевченко В., Чемодуров О. Стерлядь та ленський осетер як об'єкти вирощування в УЗВ. *Інноваційні підходи до формування та управління антропогенними і природними екосистемами півдня України*: матеріали наук.-практич. інтернет-конференції викладачів, молодих вчених та здобувачів вищої освіти від 18–19 березня 2020 року. Херсон. С. 24–25.
8. Kim I.B. Closed Aquaculture Systems for the Mass Production of Food Fish. National Fisheries University of Pusan Taeyon-dong, Nam-gu, Pusan. 1997. P. 423–436.
9. Озиранський Ю., Колесник Н., Симон М., Щербак С., Кононенко Р., Федоренко Н. Тиліяпія (Tilapia) як один із основних об'єктів сучасної аквакультури. Досвід культивування в Ізраїлі (огляд). *Рибогосподарська наука України*. 2018. № 3. С. 50–88.
10. Шарило Ю., Федоренко М., Вдовенко Н., Поплавська О., Курмаєв П., Михальчишина Л., Дмитришин Р. Практичні рекомендації щодо виробництва тиліяпії в умовах конкурентного середовища та продовольчих викликів. Київ: Списовський, 2020. 25 с.
11. Binh C.Th., Lin C.K. Shrimp culture in Vietnam. *World Aquacult*. 1995. № 4. P. 27–33.
12. Farook M., Muthu Mohamed H., Mohammed Tariq N.P.M., Muhammed Shariq K., Aadil Ahmed I. Giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (De Man 1879): a review. *International Journal of Research and Analytical Reviews*. 2019. V. 6 (1). P. 571–584.
13. Волянський Л., Туранов В. Досвід культивування прісноводної креветки на півдні України. *Таврійський науковий вісник*. 2003. Вип. 29. С. 44–45.
14. Євтушенко М. Методика досліджень у рибництві. Київ: НУБіП, 2013. 130 с.
15. Рекомендації з виробництва в рециркуляційних аквакультурних системах. Київ: Методично-технологічний центр з аквакультури, 2019. 67 с.
16. Жигін А. Шляхи та методи інтенсифікації вирощування об'єктів аквакультури в установках із замкнутим водокористуванням (УЗВ): автореф. дис. ... докт. сільськогосп. наук: спец. 06.02.04. 2002. 40 с.
17. Статкевич С. Досвід та проблеми штучного відтворення гігантської креветки *Macrobrachium rosenbergii* (de man, 1879) в умовах Криму. *Aquatic Bioresources & Environment*. 2018. Т. 1. № 1. С. 76–85.

18. Бондаренко Л., Слепньов О. Вирощування креветки *Macrobrachium Rosenbergii* в промислових умовах. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: ДБТУ, 2021. С. 451–452.

19. Шарило Ю., Вдовенко Н., Поплавська О., Дмитришин Р., Томілін О., Герасимчук В. Формування пропозиції на рибу та інші водні біоресурси в рециркуляційних аквакультурних системах у контексті сталого розвитку сільських територій. Київ: НУБіП України, 2022. 96 с.

#### REFERENCES:

1. Brainballe Ya. (2010). Posibnyk z akvakultury v ustanovkakh zamknutoho vodopostachannia. Vvedennia v novi ekolohichni ta vysokoproduktyvni zamknuti rybovodni systemy [Guide to aquaculture in closed water supply installations. Introduction to new ecological and highly productive closed fish farming systems]. Kopenhagen. 70 s. [in Ukrainian]

2. Hrynevych N., Khomiak O., Prysiazhniuk N., Mykhalskyi O. (2019). Analiz hidrotekhnolohichnoi skladovoi industrialnykh akvaferm za zamknutoho vodopostachannia [Analysis of the hydrotechnological component of industrial aqua farms with closed water supply]. *Vodni biosursy ta akvakultura*. № 2, pp. 59–76. [in Ukrainian]

3. Goddard S., Delghandi M. (2020). Recirculating Aquaculture Systems (RAS). *Encyclopedia of the World's Biomes*. № 4.

4. Kamermans P., Garcia A.B., Joaquim S., Matias D. (2016). Recirculation nursery systems for bivalves. *Aquaculture International*. 24 (3).

5. Kononenko R. (2013). Vykorystannia ustanovky zamknutoho vodopostachannia pry intensyfikatsii vyrobnytstva ryboproduktsii [The use of a closed water supply installation during the intensification of fish production]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy*. № 2 (24), pp. 56–65. [in Ukrainian]

6. Iesipova N., Udzhmadzhuridze V. (2022). Perspektyvy zastosuvannia retsyrkuliatsiinykh system v akvakulturi [Prospects for the use of recirculation systems in aquaculture]. *Materialy nauk.-praktych. konferentsii "Ekolohichni problemy navkolyshnoho seredovyscha ta ratsionalnoho pryrodokorystuvannia v konteksti staloho rozvytku"*. 27–28 zhovtnia 2022 r., Kherson – Kropyvnytskyi, pp. 288–291. [in Ukrainian]

7. Shevchenko V., Chemodurov O. (2020). Sterliad ta lenskyi oseter yak obiekty vyroshchuvannia v UZV [Sterlet and Lena sturgeon as objects of cultivation in installations with closed water supply]. *Materialy nauk.-praktych. internet-konferentsii vykladachiv, molodykh vchenykh ta zdobuvachiv vyshchoi osvity "Innovatsiini pidkhody do formuvannia ta upravlinnia antropohennymi i pryrodnyimi ekosystemamy pivdnia Ukrainy"*. 18–19 bereznia 2020 r., Kherson, pp. 24–25. [in Ukrainian]

8. Kim I.B. (1997). Closed Aquaculture Systems for the Mass Production of Food Fish. National Fisheries University of Pusan Taeyon-dong, Nam-gu, Pusan. P. 423–436.

9. Oziranskiy Yu., Kolesnik N., Simon M., Scherbak S., Kononenko R., Fedorenko N. (2018). Tiliapiia (Tilapini) yak odyin iz osnovnykh obektiv suchasnoi akvakultury. Dosvid kulytvuvannia v Izraili (ohliad). [Tilapia (Tilapini) as one of the main objects of modern aquaculture. Cultivation experience in Israel (review)]. *Rybohospodarska nauka Ukrainy*. № 3, pp. 50–88. [in Ukrainian]

10. Sharylo Yu., Fedorenko M., Vdovenko N., Poplavska O., Kurmaiev P., Mykhalchyshyna L., Dmytryshyn R. (2020). Praktychni rekomendatsii shchodo vyrobnytstva tyliapii v umovakh konkurentnoho seredovyscha ta prodovolchyykh vyklykiv [Practical recommendations for tilapia production in a competitive environment and food challenges]. K.: Spysovskyi. 25 s. [in Ukrainian]

11. Binh C.Th., Lin C.K. (1995). Shrimp culture in Vietnam. *World Aquacult.* № 4, pp. 27–33.

12. Farook M.A., Muthu Mohamed H.S., Mohammed Tariq N.P.M., Muhammed Shariq K., Aadil Ahmed I. (2019). Giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (De Man 1879): a review. *International Journal of Research and Analytical Reviews*. V. 6 (1), pp. 571–584.

13. Volianskyi L., Turanov V. (2003). Dosvid kulytvuvannia prysnovodnoi krevetky na pivdni Ukrainy [Experience of freshwater shrimp cultivation in the south of Ukraine]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk*. Vyp. 29, pp. 44–45. [in Ukrainian]

14. Ievtushenko M. (2013). Metodyka doslidzhen u rybnytstvi [Methodology of research in fish farming]. K.: NUBiP. 130 s. [in Ukrainian]

15. Metodychno-tekhnolohichni tseentr z akvakultury (2019). Rekomendatsii z vyrobnytstva v retsyrkuliatsiinykh akvakulturnykh systemakh [Recommendations for production in recirculating aquaculture systems]. Kyiv. 67 s. [in Ukrainian]

16. Zhyhin A. (2002). Shliakhy ta metody intensyfatsii vyroshchuvannia obektiv akvakultury v ustanovkakh iz zamknutym vodokorystuvanniam (UZV): avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovooho stupenia doktora silskohospodarskykh nauk: 06.02.04 [Ways and methods of intensification of the cultivation of aquaculture

objects in installations with closed water use: abstract of the dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Agricultural Sciences: 06.02.04]. 40 s. [in Ukrainian]

17. Statkevych S. (2018). Dosvid ta problemy shtuchnoho vidtvorennia hihantskoi krevetky *Macrobrachium Rosenbergii* (de man, 1879) v umovakh Krymu [Experience and problems of artificial reproduction of giant shrimp *Macrobrachium Rosenbergii* (de man, 1879) in Crimea]. *Aquatic Bioresources & Environment*. T. 1. № 1, pp. 76–85. [in Ukrainian]

18. Bondarenko L., Slepnov O. (2018). Vyroshchuvannia krevetky *Macrobrachium Rosenbergii* v promyslovykh umovakh [Growing shrimp *Macrobrachium Rosenbergii* in industrial conditions]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Suchasna inzheneriia ahropromyslovykh i kharchovykh vyrobnytstv"*. Kharkiv: DBTU, pp. 451–452. [in Ukrainian]

19. Sharylo Yu., Vdovenko N., Poplavska O., Dmytryshyn R., Tomilin O., Herasymchuk V. (2022). Formuvannia propozyitsii na rybu ta inshi vodni bioresursy v retsyrkuliatyivnykh akvakulturnykh systemakh u konteksti staloho rozvytku silskykh terytorii [Formation of supply for fish and other aquatic biological resources in recirculating aquaculture systems in the context of sustainable development of rural areas]. K.: NUBiP Ukrainy. 96 s. [in Ukrainian]

УДК 622.882+550.41

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-12>

## ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ ДАМБИ ХВОСТОСХОВИЩА

**Пікареня Дмитро Сергійович,**

доктор геологічних наук, професор,  
професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0003-1405-7801

**Орлінська Ольга Вікторівна,**

доктор геологічних наук, професор,  
професор кафедри гірничої справи  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0003-3202-7577

**Рудаков Леонід Миколайович,**

кандидат сільськогосподарських наук, доцент,  
декан еколого-меліоративного факультету  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
ORCID ID: 0000-0001-7277-7220

**Гапич Генадій Васильович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри експлуатації гідромеліоративних систем та технології будівництва  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
ORCID ID: 0000-0001-5617-3566

*В результаті застосування комплексу геофізичних методів на огороджуючих дамбах хвостосховища «Дніпровське» у складі методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі та вертикального електричного зондування встановлені ділянки підвищеного зволоження ґрунтів, які складають тіло дамби, визначено їх просторове положення та глибини від поверхні. Показано, що положення цих ділянок протягом шості років не змінилося, що свідчить про надійну їх фіксацію за допомогою комплексу застосованих методів. Контрольне буріння показало наявність зволжених ґрунтів у цих зонах. В якості рекомендацій щодо недопущення подальшого розвитку небезпечних інженерно-геологічних процесів у тілі дамби запропонована низка заходів щодо моніторингу за технічним станом та розробки проекту відновлення технічного стану до нормативних показників.*

**Ключові слова:** хвостосховище, екологічна безпека, огорожувальна дамба, геофізичний метод.

### ***Pikarenia Dmytro, Orlinska Olha, Rudakov Leonid, Hapich Hennadii. Experience in applying geophysical methods to assess the technical condition of the tailings dam***

*As a result of applying a complex of geophysical methods on the enclosing dams of the Dniprovsk tailings dump, including the method of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth and vertical electrical sounding, the areas of increased soil moisture that make up the body of the dump were identified, their spatial position and depth from the surface were determined. It is shown that the position of these areas has not changed over the past six years, which indicates that they are reliably fixed using a set of applied methods. Control drilling showed the presence of moistened soils in these areas. As recommendations to prevent the further development of hazardous engineering and geological processes in the dam body, a number of measures are proposed to monitor the technical condition and develop a project to restore the technical condition to regulatory indicators.*

**Key words:** tailing dump, environmental safety, containment dam, geophysical method.

Хвостосховище «Дніпровське» є одним з об'єктів накопичення радіоактивних відходів колишнього Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське Дніпропетровської області). Воно розміщене в заплаві р. Дніпро на правому березі

на відстані приблизно 10 км вниз за течією від греблі Середньодніпровського водосховища. З півдня і заходу уздовж хвостосховища протікає р. Коноплянка, що впадає в р. Дніпро. Складування відходів переробки уранової сировини

Придніпровським хімічним заводом (нині не працює) в хвостосховище проводилося з 1954 по 1968 р. способом гідронамиву. В результаті в ньому на сьогодні заскладовано біля 12 млн.т. відходів переробки уранових руд із загальною оціночною активністю приблизно  $1,4 \cdot 10^{15}$  Бк [1, 2].

Дослідження, що проводилися в цьому районі багатьма колективами показують, що відбувається постійна фільтрація забруднених радіаційних розчинів з хвостосховища, які забруднюють ґрунти, рослини на прилеглих територіях, а також донні відкладення в р. Коноплянка. Отже, вивчення технічного стану дамб та визначення шляхів міграції рідини є дуже актуальною науковою та практичною задачею [2].

За будовою хвостосховище відноситься до рівнинно-наливного типу та було створено шляхом споруди замкнутого контуру захисних дамб, протяжність периметру яких біля 4 км. Дамби зведені на алювіальних пісках і суглинках і в процесі експлуатації хвостосховища нарощувалися. Тіло дамб складає різномірний матеріал – від відходів коксохімічного виробництва (вуглисті шлаки, піски, супіски) і будівельного сміття (уламки цегли, цементний пил) до пилюватих і дрібних пісків і лесових суглинків і супісків. Протифільтраційні елементи, як в тілі дамби, так і в підставі чаші не закладені. Поверхня хвостосховища не спланована, поверхневий стік не організований. На низовому укосі дамби утворилися численні дрібні вимоїни, у її південній частині спостерігається просідання гребеня. Це свідчить про розвиток ерозійних процесів на поверхні дамби, що при одночасному підйомі рівня вод техногенного водоносного горизонту і розвитку суфозії, може призвести до її руйнування [1, 2].

Хвостосховище перекрите шаром фосфогіпсу товщиною від 1-5 м поблизу дамб до 19 м в центральній і східній частині чаші, який запобігає надходженню в атмосферну радіоактивних речовин при вітровому пилінні.

З півночі до хвостосховища прилягають відстійники коксохімічного виробництва, зі сходу – відстійник металургійного виробництва ПрАТ «Камет-Сталь», північно-західна частина території хвостосховища засипана вуглистими шлаками та відходами металургійного виробництва без проекту (рис. 1) [1].

Наприкінці 2016 р. ТОВ «ЦРЕМ» під керівництвом професорів Орлінської О.В. і Пікарени Д.С. були виконані дослідження «Проведення інструментального геофізичного та лабораторного обстеження дамби хвостосховища «Дніпровське» та розрахунок стійкості низового



**Рис. 1. Сучасний стан хвостосховища «Дніпровське» за даними інтернет-порталу Google Earth**

укосу дамби в рамках провадження ліцензійної діяльності ДП «Бар'єр» [3]. В результаті застосування геофізичного електророзвідувального методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ) на південно-східній дамбі хвостосховища виявлено дві зони з підвищеним рівнем стояння ґрунтових вод довжиною 60 м та 380 м. На південно-західній частині дамби також виявлені дві аналогічних зони довжиною 40 м та 20 м. В цих зонах було проведено інженерно-геологічне буріння 15 свердловин з відбором керну та лабораторним аналізом фізико-механічних властивостей порід. Лабораторні дані використані для оцінки гідрогеомеханічної стійкості низового відкосу огорожуючої дамби хвостосховища «Дніпровське». В результаті розрахунків встановлено, що значення коефіцієнту стійкості південно-східної частини дамби знаходяться в межах 1,78 – 3,02, що перевищує мінімальну критичну величину 1,2, тобто дамба має значний запас стійкості [3].

У 2022 року проведена оцінка стійкості усіх огорожуючих дамб хвостосховища «Дніпровське» в межах земельного відводу. Згідно з програмою виконувалися геофізичні дослідження із залученням електророзвідувальних методів природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ) по гребню огорожуючих дамб за мережею спостереження 3×3 метри та вертикального електричного зондування (ВЕЗ). Результатом застосування цих методів стало виділення у плані ділянок зменшення щільності потоку імпульсів ПІЕМПЗ, їх інтерпретація, визначення глибини рівнів ґрунтових вод у дамбі [3].

Зупинимось коротко на суті вказаних методів.

Метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ) відноситься до групи електророзвідувальних геофізичних методів. Його застосування рекомендовано нормативними геологорозвідувальними документами, також він залучається при проведенні інженерно-геологічних вишукувань, що знайшло відображення у Державних будівельних нормах ДБН А.2.1-1-2014 [4].

Метод заснований на реєстрації природного імпульсного електромагнітного випромінювання Землі, яке складається з трьох джерел: зовнішнього – сонячна радіація і космічні поля; внутрішнього – обумовлюється геологічними процесами під або безпосередньо на денній поверхні; техногенного – різного роду промислові і побутові випромінювання. Діапазон частот такого інтегрального імпульсного електромагнітного поля від перших герц до мега- і навіть гігагерц. Природне імпульсне електромагнітне поле, що генерується саме внутрішніми джерелами, використовується з метою вивчення геологічних особливостей територій [2].

Відомо досить багато процесів і явищ, в результаті або протягом яких виникає електромагнітне випромінювання або електромагнітна емісія (застосовуються обидва терміни). Одним з них є п'єзоелектричний ефект мінералів і гірських порід. Іншим досить потужним джерелом служать тектонічні напруги масиву гірських порід, особливо на рівні тисків, що передують утворенню тріщин. Третім значущим джерелом виступають різні електричні і електрохімічні процеси в породних масивах (зміни подвійного електричного шару, електронна емісія при русі розчинів, хімічні перетворення мінералів і порід). В результаті перерахованих процесів утворюється стрибкоподібний сплеск електромагнітного випромінювання, який і називається імпульсом електромагнітного поля. Він характеризується різким збільшенням амплітуди і енергії випромінювання і дуже коротким (мілі- і мікросекунди) часом прояву. Частота проходження імпульсів ПІЕМПЗ від перших герц до 20 кілогерц, цим поле ПІЕМПЗ відрізняється від атмосферних і техногенних джерел. В поле ПІЕМПЗ відсутня будь-яка періодичність, характерна для техногенних випромінювачів, що служить для розділення цих джерел [2].

Експериментальними дослідженнями різних авторів встановлено, що при стисненні кристалічних порід зростає кількість, енергія і амплітуда імпульсів ПІЕМПЗ, які перед початком крихких деформацій досягають максимуму. Як тільки настає фаза руйнування

(утворення тріщин), кількість імпульсів різко (вертикально) зменшується аж до нуля і потім незначно зростає до деякого рівня, на якому і залишається [2].

Електромагнітне випромінювання має здатність поширюватися в твердих породах на значну відстань від джерела, при цьому його амплітуда і енергія змінюється досить слабо. Якщо ж на шляху поширення електромагнітного випромінювання зустрічається ділянки замочування порід або зона порожнечі (обводнені і сухі тріщини і т.п.), то інтенсивність випромінювання дуже різко зменшується, а при потужній зоні воно взагалі розсіюється або поглинається. Завдяки цій особливості можна виділяти ділянки, які мають різну щільність потоку електромагнітних імпульсів, тобто кількості імпульсів за одиницю часу.

Ідея застосування методу ПІЕМПЗ з метою проведення даного дослідження наступна: імпульсне електромагнітне поле генерується к кристалічних породах Українського щита. Якщо на шляху його розповсюдження зустрічаються обводнені ділянки порід, то його рівень та кількість імпульсів має зменшуватися. Теж саме буде проявлятися у тріщинуватих породах, до яких можна віднести насипні техногенні ґрунти. Розрізнити зони обводнення та техногенні ґрунти можна за допомогою інших методів [5].

Для досліджень застосовувався прилад «СІМЕІЗ» (мікропроцесорний індикатор електромагнітного поля – МІЕМП 14/4), який призначений для вивчення ПІЕМПЗ, а також електромагнітного поля техногенного походження в лабораторних і польових умовах.

Дамба на хвостосховищі була умовно поділена на дві частини північну і південну, які мають різну будову, склад, функції та екологічну значущість. Якщо північна дамба відокремлює площу відводу хвостосховища від техногенних об'єктів інших підприємств, то південна дамба є опорною і захисною від відходів для прилеглих до хвостосховища територій. Це в першу чергу стосується долини р. Коноплянка, куди можуть потрапляти фільтрати зі хвостосховища при неналежному технічному стані південної дамби, тому цій частині дамби було приділено найбільшу увагу під час досліджень. Тут польові роботи проводились тільки у профільно-площинному варіанті. Вздовж дамби закладались 4 профілі з відстанню між ними 3 м, точки спостережень на них розташовувались теж через 3 м, тобто по квадратній мережі. Така квадратна мережа є оптимальною для виконання будь-яких геофізичних робіт [2].

Північна дамба досліджувалась також у профільно-площинному варіанті, як і при дослідженнях на південній частині дамби.

В ході проведення польових робіт на греблі виділялися прямолінійні ділянки так, щоб початок і кінець профілів знаходилися в межах бачення). Це пов'язане з особливостями побудови карт і застосовано для того, щоб уникнути додавання зайвої інформації під час інтерполяції. Координати початку і кінця профілів, свердловин і поверхневих марок (ПМ), що потрапляли у ділянки та які були пробурені і встановлені в інші роки, фіксувались GPS. Всі ці координати потім співставлялися і коректувалися високоточними геодезичними вимірюваннями

Обробка результатів досліджень здійснювалась шляхом складання для кожної ділянки карт щільності потоку імпульсів магнітної складової ПІЕМПЗ для кожної антени у програмному середовищі Surfer. Для побудови карт використаний метод триангуляції з лінійною інтерполяцією за квадратною вузловою мережею.

В основу інтерпретації карт покладена відмічена вище особливість поля ПІЕМПЗ, а саме – зменшення щільності потоку імпульсів магнітної складової електромагнітного поля у ділянках, які розуцільнені, тріщинуваті або обводнені. Додатково використовується вигляд рисунку поля ПІЕМПЗ. Так, для суцільних, монолітних порід та матеріалів характерне дуже диференційоване поле, з великою кількістю ізоліній та великим розмахом (амплітудою) значень. Для тріщинуватих ділянок рисунок поля більш витриманий, але також диференційований, хоча у меншому ступеню. Обводнені ж ділянки мають спокійний, «розмитий» рисунок поля, з невеликою кількістю ізоліній, значення яких знаходяться на низьких рівнях [2].

Для кожної ділянки досліджень та для даних, отриманих з кожної антени побудовані карти щільності потоку імпульсів магнітної складової природного імпульсного електромагнітного поля Землі, приклад таких карт наданий на рис. 2. За методикою та принципами інтерпретації зйомки ПІЕМПЗ, наведеними вище, виділені зони названі аномальними, в яких діагностується розуцільнення та обводнення матеріалів, з яких складена дамба. Усього виділено 33 зони, їх розташування показано на рис. 3.

Після виділення аномальних зон у найбільш характерних точках проведені дослідження методом вертикального електричного зондування.

Метод вертикального електричного зондування (ВЕЗ) є одним з найбільш поширених електророзвідувальних методів. Однією

з основних вимог до його застосування є контрастність за фізичними властивостями об'єкту вивчення відносно вміщуючого середовища, тобто, об'єкт (тіло, шар, пласт та ін.), що вивчається, повинен помітно (бажано у декілька разів) відрізнитися по питомому електричному опорі від вміщуючих порід [2].

ВЕЗ прийнято використовувати для вивчення горизонтально-шаруватих середовищ з невеликими кутами нахилу меж (до 15-20 градусів).

Згідно з методикою досліджень на поверхні землі збирається симетрична електророзвідувальна установка типу Шлюмберже, яка складається з двох живлячих електродів і двох приймальних (рис. 4). В якості електродів застосовуються металеві штирі, які забиваються у ґрунт на глибину до 20 см. Половинна відстань між живлячими електродами А і В (рознос АВ/2) складає 3 м, 4,5 м, 6 м, 9 м, 15 м, між приймальними електродами М і N (рознос MN) – 1 м [5].

До живлячих електродів підключається джерело струму – генератор постійного струму. У землі виникало електричне поле і, відповідно, електричний струм. Сила струму в живлячій лінії ( $I_{AB}$ ) вимірювалася за допомогою амперметра, включеного в електричне коло АВ.

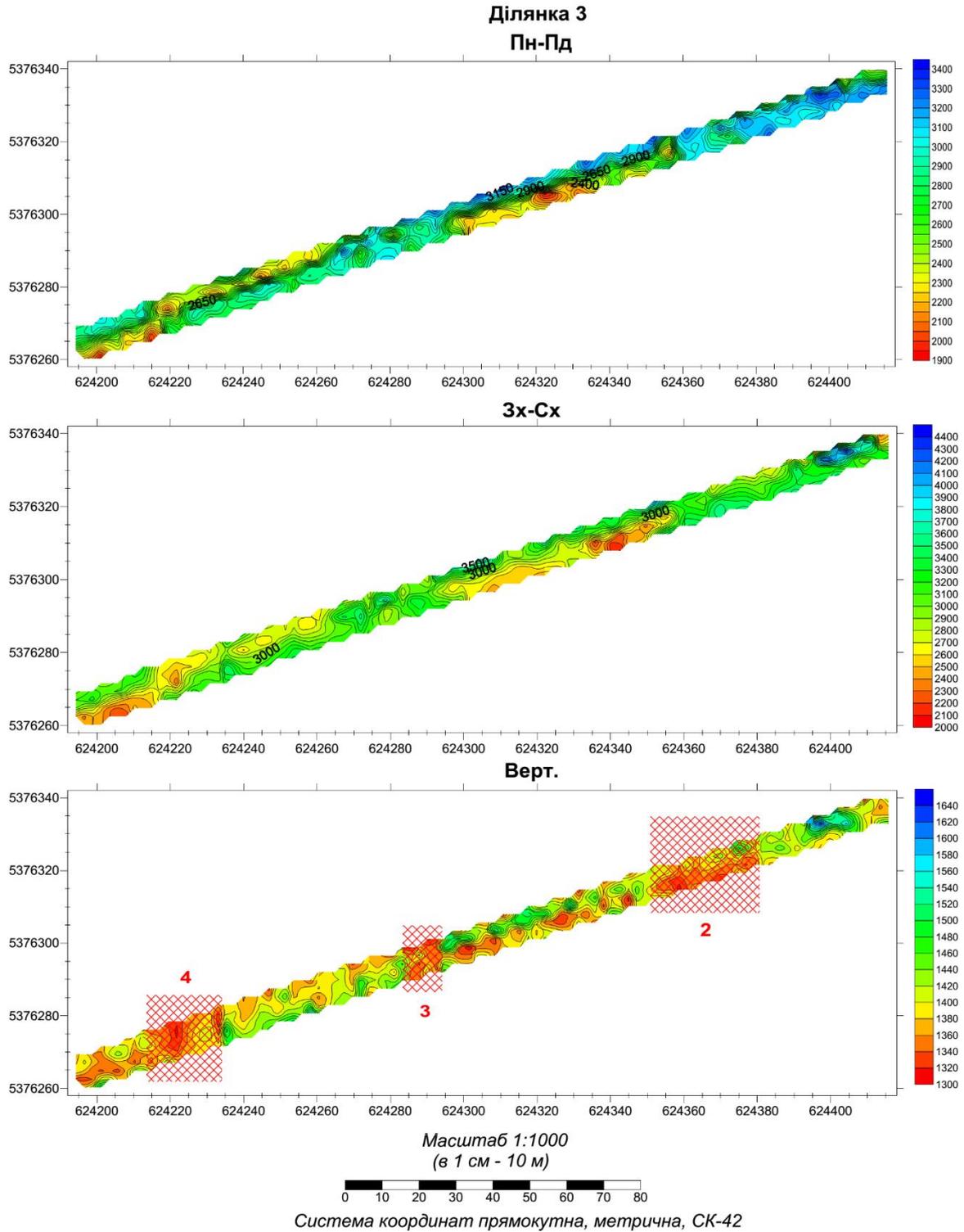
На приймальних електродах М і N виникала різниця електричних потенціалів ( $\Delta U_{MN}$ ), яка вимірювалася за допомогою вольтметра.

За результатами вимірів можна судити про електричні властивості гірських порід на глибинах проникнення струму в землю. Глибина «занурення струму» залежить, в основному, від відстані між електродами А і В.

Для виконання зондування здійснюють серію вимірів, поступово збільшуючи розмір живлячої лінії АВ. Чим більше параметр АВ/2 – тим глибше «занурюється струм в землю» і тим більше глибинність дослідження. При цьому кожна наступна область дослідження повністю включає попередню. В результаті описаної серії вимірів виходить набір значень уявного опору, виміряних при відомих АВ/2.

При дослідженнях використовувалася апаратура електророзвідувальна шахтна (ШЕРС-5М), яка призначена для проведення в наземних умовах і гірничих виробках геофізичних робіт методами електророзвідки.

Обробка та інтерпретація результатів вимірювання питомого електричного опору порід проводилася за допомогою програми IPI2Win. Ця програма розроблена для автоматичної і напівавтоматичної (інтерактивної) інтерпретації даних різних модифікацій вертикальних електричних зондувань, в тому числі традиційними



**Рис. 2. Приклад карти щільності потоку імпульсів магнітної складової природного імпульсного електромагнітного поля Землі на дамбі хвостосховища «Дніпровське» за антенами, орієнтованими у меридіональному (Пн-Пд), широтному (Зх-Сх) та вертикальному (Верт.) напрямках**

*Примітка: кольорові шкали характеризують щільність потоку імпульсів магнітної складової ПІЕМПЗ, імп./0,5 с; червона клітинка – ділянка розуцільнення ґрунтів дамби, обводнення та фільтрації розчинів, її номер*

установками та призначена для використання на персональних комп'ютерах. За даними ВЕЗ встановлювалася глибина залягання замочуваних ґрунтів тіла греблі.

**Комплексна інтерпретація виділених зон.** Розподіл кількості аномальних зон по дамбі хвостосховища «Дніпровське» має певні закономірності. Так, виділяються дві ділянки концентрації

аномалій – на південній частині греблі, що примикає до р. Коноплянка, та на північно-східній ділянці, яка примикає до відстійників металургійного та коксового виробництва. Декілька невеликих аномальних зон виділяються на південно-західній ділянці греблі. Найбільше занепокоєння викликає зона концентрації аномалій на перегині греблі на південній ділянці. Ця зона виділялася нами раніше при проведенні робіт з оцінки технічного стану греблі у 2016 році. Тоді також залучалися геофізичні методи ПІЕМПЗ та вимірювання ПЕД гамма-випромінювання. На рис. 3 показано співставлення положення раніше виділених та сучасних аномальних зон. Добре помітно, що майже усі вони співпадають, але є деякі відмінності, пов'язані, насамперед, з різною мережею спостережень (у 2016 році вона становила 5×5 метрів). Таке співпадіння дозволяє стверджувати, що зони виділені впевнено та є об'єктивними. Це виключає можливість помилкового виділення та свідчить про

наявність проблем з обводненням тіла греблі, яке за період 6 років тільки посилилося.

Світовий досвід експлуатації великих гребель на річках та огороджуючих гребель на хвостосховищах показує, що саме ділянки вигину греблі в бік, протилежний хвостосховищу, як й ділянки зчленування гребель, є найбільш небезпечними з точки зору розвитку аварійних ситуацій (наприклад, хвостосховища Айка, Брумадіньо, Бая-Маре, Карамкен тощо). Немає ніяких підстав вважати, що подібна ситуація неможлива й тут [2].

На північній ділянці греблі також встановлені зони обводнення, але їх походження, вочевидь, інше. Північна гребля похована під багатометровою товщею відходів металургійного виробництва та межує з відстійниками, які мають глибину до відмітки 52-50 м. Оскільки відстійники, на відміну від хвостосховища, є активними та експлуатуються, існує гідродинамічний перетік розчинів як з відстійників до хвостосховища

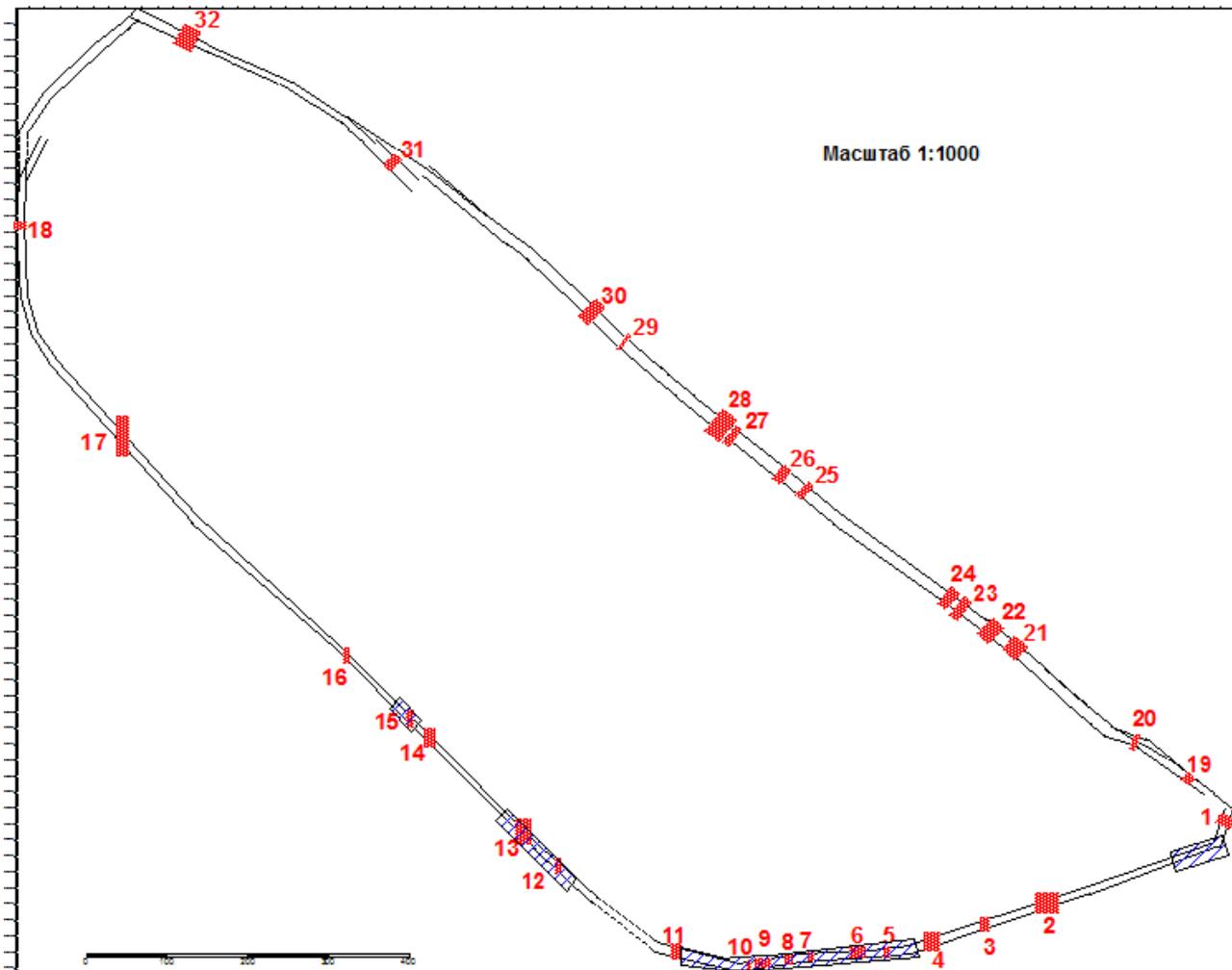


Рис. 3. Порівняльна схема розташування ділянок обводнення та фільтрації у греблі за результатами робіт 2022 року (червоне) та 2016 року (синє)



**Рис. 4. Схематичне зображення симетричної електророзвідувальної установки типу Шлюмберже: A, B – живлячі електроди, M, N – приймаючі електроди**

через греблю, так й назад, з хвостосховища до відстійників. Радиоактивного забруднення у відстійниках поки що не зафіксовано, але гребля у нижній частині інтенсивно обводнена. Це не впливає на її геомеханічну стійкість, оскільки прориватися нема куди – з усіх боків вона затиснута радиоактивними відходами, металургійними шламами та зверху – відходами коксохімічного виробництва та фосфогіпсом. На південно-західній ділянці також виділяються декілька зон розущільнення, але казати про фільтрацію розчинів з боку хвостосховища немає підстав [2].

За результатами геофізичних робіт виділені ділянки, на яких поставлено інженерно-геологічне буріння. В межах площі вишукувань виділено водоносний горизонт, що належить до четвертинних алювіальних відкладів заплави та кори звітрювання кристалічних порід, яка їх підстилає. Характеризується водоносний комплекс приуроченістю до надзаплавних терас четвертинного віку р. Дніпро та його притоків, водовміщуючі породи представлені різнозернистими пісками з прошарками суглинків, супісків, глин, та уламково-тріщинувата зона архейських гранітоїдів що їх підстилає. Безпосередньо на ділянці огорожувальної дамби у період проведення вишукувань підземні води зустрінуті у південній частині дамби на глибинах 4,0-6,2 м, на південно-західній ділянці дамби на глибинах 9,0-10,2 м від поверхні. Окрім основного водоносного горизонту вище по розрізу було розкрито локальні малопотужні горизонти «верховодки», що чітко фіксуються при бурінні та підтверджуються даними фізичних властивостей ґрунтів, які були відібрані з цих глибин. Таким чином результати бурових робіт повністю підтверджують виділені за геофізичними даними зони обводнення і розущільнення.

**Висновки та рекомендації.** Моніторингові дослідження, проведені у 2016 та 2022 рр.

показали суттєве погіршення, особливо, в південно-східній частині, технічного стану огорожувальної дамби Дніпровського хвостосховища, а тому пропонується наступне [2]:

1. В 2025-2026 рр. провести повний комплекс досліджень, який включає геофізичні методи ( ПІЕМПЗ, ВЕЗ, радіометрія), буріння свердловин з відбором проб та їх лабораторним аналізом.

2. На виділеній небезпечній ділянці дамби в південно-східній частині один раз на рік, чи один раз у два роки, робити скорочений комплекс геофізичних досліджень, невеликий об'єм бурових робіт та лабораторний аналіз відібраних проб ґрунтів.

3. В південно-східній частині дамби, де визначені ділянки фільтрації, встановити геодезичні марки для спостережень за зсувними деформаціями на дамбі.

4. Чотири рази на рік відслідковувати рівень ґрунтових вод в спостережних свердловинах, а також відбирати воду на аналіз щодо наявності в ній радіонуклідів.

5. У підніжжя північної частини дамби на стику з відстійниками ДМЗ один раз на рік проводити контроль радіаційного фону для встановлення можливих зон фільтрації забруднених розчинів.

6. З метою визначення шляхів міграції забруднених розчинів 4 рази на рік відбирати проби ґрунтів на схилах дамби, а також зразки рослин для аналізу наявності в них радіонуклідів.

7. Чотири рази на рік досліджувати стан води та донних відкладень у р. Коноплянка, приділивши підвищену увагу пробам перед дамбою на річці.

Для поліпшення технічного стану хвостосховища «Дніпровське» пропонується розробити проектну документацію та реалізувати заходи, які забезпечать:

- організоване відведення поверхневих вод з поверхні хвостосховища;
- реорганізацію рельєфу поверхні хвостосховища;
- укріплення низового укосу дамби хвостосховища;
- зниження фільтрації через дамбу хвостосховища.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Інструментальний контроль стану захисних споруд хвостосховища «Дніпровське». Звіт. ТОВ «УТБ-2». Кам'янське, 2016. 37 с.
2. Пікареня Д. С., Орлінська О. В., Рудаков Л. М. Оцінка технічного стану огорожувальної дамби хвостосховища «Дніпровське» геофізичними методами / MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education : Scientific monograph. Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2023. С. 182-198. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-10>

3. Д. Пікареня та ін. Оцінка стійкості огорожуючих дамб хвостосховища «Дніпровське»: Загальна пояснювальна записка. Книга 1. Кривий Ріг : ТОВ «БАЙТПРОДЖЕКТ», 2022. 154 с.
4. ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва. Київ, 2014. 126 с.
5. H. Hapich, O. Orlinska, D. Pikarenia, I. Chushkina, A. Pavlychenko, H. Roubik. Prospective methods for determining water losses from irrigation systems to ensure food and water security of Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. № 2. P. 154–160. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/154>

#### REFERENCES:

1. Instrumentalni kontrol stanu zakhysnykh sporud khvostoskhovyshcha «Dniprovske». Zvit [Instrumental monitoring of the condition of protective structures of the Dniprovske tailing dump. Report]. Kamianske, UTB-2 LLC. 2016. 37 s. [in Ukrainian].
2. Pikarenia D.S., Orlinska O.V., Rudakov L.M. (2023). Otsinka tekhnichnoho stanu ohorodzhuvalnoi damby khvostoskhovyshcha «Dniprovske» heofizychnymy metodamy [Evaluation of the technical condition of the Dneprovske tailings dam using geophysical methods]. MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education : Scientific monograph. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”. pp. 182-198. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-10> [in Ukrainian].
3. Pikarenia D. and other (2022). Otsinka stiikosti ohorodzhuuiuchykh damb khvostoskhovyshcha «Dniprovske»: Zahalna poiasniuvalna zapyska. Knyha 1. [Assessment of the stability of the enclosing dams of the Dniprovske tailings dump: General explanatory note. Book 1]. Kryvyi Rih: WHITEPROJECT LLC. 154 p. [in Ukrainian].
4. ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва [ДБН А.2.1-1-2014. Engineering surveys for construction]. Київ, 2014. 126 с. [in Ukrainian].
5. H. Hapich, O. Orlinska, D. Pikarenia, I. Chushkina, A. Pavlychenko, H. Roubik (2023). Prospective methods for determining water losses from irrigation systems to ensure food and water security of Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. № 2. pp. 154–160. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/154>

## ГІРНИЦТВО

УДК 622.271

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-13>

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВИЙМАЛЬНО-НАВАНТАЖУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ В УМОВАХ ТОВ «ЄРИСТІВСЬКИЙ ГЗК»

**Григор'єв Ігор Євгенійович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри гірничої справи  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0009-0006-2787-106X

**Григор'єв Юліан Ігорович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри відкритих гірничих робіт  
Криворізький національний університет  
ORCID ID: 0000-0002-1780-5759

**Швець Єгор Миколайович,**

кандидат технічних наук  
старший викладач кафедри відкритих гірничих робіт  
Криворізький національний університет  
ORCID ID: 0000-0003-1865-2018

**Луценко Сергій Олександрович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри відкритих гірничих робіт  
Криворізький національний університет  
ORCID ID: 0000-0002-5992-3622

**Лукін Антон Юрійович,**

студент групи ГІВ-23-1м  
Криворізький національний університет  
ORCID ID: 0009-0002-3788-4965

*Метою роботи є підвищення ефективності використання виймально-навантажувального обладнання на Єристівському кар'єрі за рахунок впровадження інформаційних технологій. Для вирішення поставлених задач у статті були використанні такі методи: аналіз і синтез наукових джерел інформації для дослідження наукових основ використання виймально-навантажувального обладнання, аналіз світового досвіду ефективного використання виймально-навантажувального обладнання, аналіз досвіду впливу автоматизованих систем управління гірничим транспортом на виймально-навантажувальне обладнання; методи регресійного аналізу, економіко-математичного моделювання і техніко-економічної оцінки. Наукова новизна результатів дослідження полягає у встановленні факторів, які впливають на продуктивність виймально-навантажувального обладнання. Практична значимість полягає у можливості використання результатів досліджень гірничими підприємствами та проектними організаціями під час планування гірничих робіт. Таким чином, у роботі виконано порівняння продуктивності виймально-навантажувального обладнання, що використовується в умовах Єристівського кар'єра, в результаті чого було встановлено, що очікувана та фактична продуктивність має певні відмінності через показник часу циклу навантаження. В результаті досліджень було встановлено, що час циклу за куту повороту від 20° до 30° буде мінімальним та збільшить продуктивність драглайну. Крім того, в конкретних гір-*

ничо-технічних умовах встановлено, що впровадження автоматизованої системи управління "WENCO" дало змогу збільшити продуктивність гірничотранспортного комплексу та загалом покращити техніко-економічні показники роботи кар'єру.

**Ключові слова:** кар'єр, виймально-навантажувальне обладнання, екскаватор, час циклу навантаження, автоматизована система управління гірничим транспортом.

**Hryhoriev Ihor, Hryhoriev Yulian, Shvets Ehor, Lutsenko Serhii, Lukin Anton. Study of the efficiency of use of extraction and loading equipment in the conditions of "Yeristivsky MPP" LTD**

*The purpose of the paper is to increase the efficiency of the use of excavator equipment at the Yeristivsky open-pit due to the introduction of information technologies. The following methods were used to solve the problems in the paper: analysis and synthesis of scientific sources of information for the study of the scientific foundations of the use of extraction and loading equipment, analysis of world experience in the effective use of extraction and loading equipment, analysis of the experience of the influence of automated mining transport control systems on extraction and loading equipment; methods of regression analysis, economic-mathematical modeling and technical-economic assessment. The scientific novelty of the research results lies in the establishment of factors that affect the productivity of the extraction and loading equipment. The practical significance lies in the possibility of using research results by mining enterprises and project organizations when planning mining operations. Thus, the paper compares the performance of the excavator equipment used in the conditions of the Yeristov open-pit, as a result of which it was established that the expected and actual performance have certain differences due to the indicator of the load cycle time. As a result of research, it was established that the cycle time at a turning angle of 20° to 30° will be minimal and will increase the productivity of the dragline. In addition, in specific mining and technical conditions, it was established that the implementation of the automated management system "WENCO" made it possible to increase the productivity of the mining transport complex and, in general, improve the technical and economic performance of the pit.*

**Key words:** open-pit, extraction and loading equipment, excavator, load cycle time, automated mining transport management system.

Сьогодні видобуток залізної руди є одним з найбільших важливих напрямів розвитку світової промисловості. Попит на залізо останнім часом на світових ринках значно виріс, тому розроблення нових родовищ залізної руди, нарощування темпів видобутку, вдосконалення систем розробки на наявних родовищах є важливими для задоволення попиту.

Компанія "Ferrexpo" у 2008 році розпочала будівництво Єристівського кар'єру, що розташований на Єристівському родовищі Кременчуцького району Полтавської області. Для досягнення високих виробничих показників видобутку залізної руди в процесі відкритих гірничих робіт на цьому кар'єрі використовується високопродуктивне, ефективне та безпечне обладнання. Виймально-навантажувальні роботи – один з основних технологічних процесів у кар'єрах. Їх питома вага у загальних витратах на відкриту розробку родовищ сягає 25%. Ефективність виймально-навантажувальних робіт під час навантажування гірничої маси на залізничний і автомобільний транспорт значною мірою залежить від організації обмінних операцій на уступах, поєднання параметрів виймально-навантажувального і транспортного обладнання, взаємоузгодження виймально-навантажувальних робіт з іншими суміжними процесами.

Тривалість циклу навантаження є одним з ключових аспектів під час розрахунку продуктивності виймально-навантажувального

обладнання. Для визначення продуктивності обладнання гірниче підприємство вимірює його час циклу, а також ефективність машиніста [1]. Як правило, більш високі значення тривалості циклу висвітлюють проблеми в процесі навантаження. Таким чином, досліджуючи хронометраж тривалості циклу, можна встановити контрольні показники, що дасть змогу швидко визначити і вирішити проблеми.

Різним дослідникам вдалося визначити аспекти гірничої справи, де можна зробити покращення на основі оптимізації тривалості циклу. Незважаючи на те, що більшість дискусій була зосереджена на кар'єрних автосамоскидах, дуже мало досліджень було проведено стосовно продуктивності екскаватора, оскільки вона пов'язана з тривалістю циклу [2; 3; 4]. З появою гідравлічних екскаваторів продуктивність обладнання значно підвищилась. Відповідно, було досягнуто підвищення продуктивності гідравлічних екскаваторів за рахунок електронно-оптимізованих систем керування насосами замкнутого циклу обертання, що забезпечує більшу припустиму потужність, незалежні системи охолодження, які дають змогу екскаватору працювати на повній швидкості, а також гідравліку високого тиску [1; 5].

Традиційно під час розрахунку тривалості циклу навантаження екскаватора виділяють такі компоненти: час повороту (25%), час наповнення ковша (41%), час повороту повного ковша (24%) і час розвантаження (10%).

Оптимальна кількість ковшів для завантаження автосамоскиди становить від 3 до 6 [6]. Очевидно, що навички водіїв вантажівок і машиністів екскаваторів відіграють ключову роль у скороченні часу циклу навантаження. Завантаження вантажівки за найменшу кількість ковшів не обов'язково є найкращим підходом. Гірничі спеціалісти також зосереджують увагу на коефіцієнті заповнення разом із кількістю ковшів, але найважливішим для роботи гірничого підприємства є досягнення швидшого циклу навантаження [7].

Висота вантажівок відносно виймально-навантажувального обладнання також відіграє важливу роль у роботі навантажувального обладнання. Якщо екскаватор завантажує автосамоскиди, розташовані нижче за рівень стояння екскаватора і кут повороту (від 20° до 30°), час циклу може становити лише 20–23 секунди. З вантажівкою на верхньому уступі продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу знижується. Порівнюючи схеми навантаження, дослідники зазначають, що двостороннє завантаження хоч і є дещо складнішим, ніж одностороннє, проте за досвідом є продуктивнішим [7].

Система керування корисним навантаженням на кар'єрних вантажівках є ще одним викликом для гірничих робіт. З приходом новітніх технологій машиніст екскаватора може контролювати якість навантаження в режимі реального часу, щоб машиністи виймально-навантажувального обладнання могли збільшити середнє корисне навантаження самоскида та максимізувати продуктивність без збільшення кількості ковшів.

У низці досліджень великої гірничої техніки розглянуто інші змінні, які впливають на продуктивність машини. Зокрема, було досліджено [2] вплив якості подрібнення матеріалу, який вантажили канатним екскаватором, на продуктивність навантаження.

В роботі [8] представлено результати досліджень, які порівнюють продуктивність роботи

гідравлічного екскаватора з продуктивністю канатної механічної лопати. Оцінено аналогічні машини гірничодобувного класу щодо енергії, необхідної для вилучення однакової одиниці кількості гірської маси з вибою. Результати дослідження також показали вищу собівартість на одиницю маси порівняно з екскаватором аналогічної вантажопідйомності та віку. Загалом електричні канатні екскаватори з вищою первісною вартістю покупки демонстрували нижчу питому вартість обслуговування, стаючи загалом більш економічними протягом 5 років експлуатації порівняно з гідравлічним екскаватором аналогічної потужності.

Виходячи з аналізу наукових досліджень щодо використання виймально-навантажувального обладнання під час розроблення родовищ відкритим способом, бачимо необхідність у підвищенні його ефективності за рахунок скорочення тривалості циклу, чого можна досягти шляхом використання спеціалізованих інформаційних технологій.

На основі даних продуктивності роботи основного гірничого устаткування за період з 1 січня 2021 року по 1 січня 2022 року проаналізуємо можливі шляхи її підвищення. Для подальшого детального аналізу нам необхідно визначити розрахункову експлуатаційну продуктивність устаткування. Порівняння продуктивності виконаємо для ЕШ-14/50 в умовах м'якого розкриття, а також для Bucyrus RH-200 та CAT 6060 на видобувних горизонтах по скельній гірській масі. Далі проведемо аналіз розрахункових даних продуктивності виймально-навантажувального обладнання в умовах Єристівського кар'єру і порівняємо їх з фактичними (табл. 1).

Порівнюючи дані продуктивності роботи виймально-навантажувального обладнання в умовах Єристівського кар'єру, відзначимо, що для екскаватору RH-200 фактична продуктивність за 2021 рік виявилась на 7% менше, для CAT 6060 – на 39% менше, для ЕШ-14/50 – на 21% менше, ніж розрахункова. Аналіз показників

Таблиця 1

**Показники часу циклу навантаження та продуктивності виймально-навантажувального обладнання**

| Показник   | Видобуток      |          | Розкриття |
|--|----------------|----------|-----------|
|  | Бусірус RH-200 | CAT 6060 | ЕШ-14/50  |
| Обладнання                                       |                |          |           |
| Розрахункова продуктивність, м <sup>3</sup> /зм. | 9 956          | 16 128   | 10 787    |
| Фактична продуктивність, м <sup>3</sup> /зм.     | 9 269          | 9 900    | 8 562     |
| Відхилення, %                                    | 7%             | 39%      | 21%       |
| Теоретичний час циклу, хв.                       | 3              | 2        | 4,48      |
| Фактичний час циклу, хв.                         | 2,4            | 2,31     | 6,15      |
| Різниця в часі                                   | 20 с           | 31 с     | 97 с      |

тривалості циклу навантаження екскаваторів виявив, що фактичний час циклу навантаження має достатню похибку.

Єристівське родовище складне за гідргеологічними умовами (4 водоносні горизонти). М'які розкривні породи мають середню потужність 68–70 м з низькою пропускною здатністю.

У зв'язку з цим як основне виймально-навантажувальне обладнання під час розроблення розкривних порід на кар'єрі доцільно використовувати крокуючі екскаватори – драглайни типу ЕШ-14/50 та ЕШ-11/70. При цьому екскаватори ЕШ-11/70 передбачається використовувати для проходження осушувальних траншей та їх поглиблення. За подальшого розвитку гірничих робіт для збільшення продуктивності кар'єру по наносах можна переобладнати екскаватор ЕШ-11/70 у ЕШ-14/50 шляхом скорочення стріли на 20 м та заміни ковша на більш місткій.

Відомо, що значну частину загальної собівартості одиниці кінцевої продукції від розроблення корисних копалин займає вартість екскавації розкривних порід. Драглайни працюють у комплексі з автосамоскидами Cat-789С вантажопідйомністю 180 т. Річні обсяги виїмки м'якого розкриття становлять 40–50 млн м<sup>3</sup>. Висоти уступів по наносах становлять 13, 12, 13, 12, 18 м (від відмітки +68 до 0) і прийняті відповідно до робочих параметрів екскаваторів. Враховуючи водонасиченість м'яких порід, проєктні кути укосів уступів по м'яких породах становлять 30°. Берми безпеки – 15 м. Відпрацювання уступів проводиться торцевим забоем.

Навантаження м'яких порід здійснюється безпосередньо в автосамоскиди, що розташовані

на рівні установки екскаватора та нижче рівня установки, тобто на верхньому майданчику уступу чи на нижньому.

З теорії та практики відкритих гірничих робіт відомо, що продуктивність роботи екскаватора-драглайна можна істотно підвищити за рахунок зменшення кута повороту із забою до точки розвантаження породи.

Зменшити кут повороту екскаватора і, відповідно, час повороту можна шляхом навантаження автосамоскида, що розташований нижче рівня стояння драглайну. Це суттєво підвищить продуктивність драглайну і продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу загалом, що приведе до скорочення витрат на розкривні роботи.

Далі було розглянуто два варіанти роботи ЕШ-11/70 із завантаженням у автосамоскиди: з верхнім і нижнім розвантаженням драглайну.

Для порівняння ефективності роботи двох схем за нижнього розвантаження породи в автосамоскиди та розвантаження на рівні стояння екскаватора визначимо річну експлуатаційну продуктивність драглайнів, а результати розрахунків наведемо у табл. 2.

Аналіз розрахунків показав, що продуктивність драглайнів значною мірою залежить від місця встановлення автосамоскида під навантаження. Під час завантаження автосамоскида на рівні установки екскаватора кут повороту складає в середньому 90°, а нижче рівня установки – 10°. Таким чином, значно скорочується тривалість робочого циклу екскаватора, при цьому зростає його продуктивність. Наприклад, річна продуктивність драглайнів ЕШ-14/50 та ЕШ-11/70 під час їх завантаження нижче рівня

Таблиця 2

**Значення річної експлуатаційної продуктивності за зміни кута повороту навантаження**

| Кут повороту, $\varphi_n$ , град. | Тривалість циклу, $t_{\text{ц}}$ , с |          | Річна експлуатаційна продуктивність $Q_p$ , тис.м <sup>3</sup> /рік |          |
|-----------------------------------|--------------------------------------|----------|---|----------|
|                                   | ЕШ-14/50                             | ЕШ-11/70 | ЕШ-14/50  | ЕШ-11/70 |
| 10                                | 28,4                                 | 28,5     | 3 955   | 3 094    |
| 20                                | 33,5                                 | 33,5     | 3 346   | 2 630    |
| 30                                | 37,9                                 | 37,7     | 2 963   | 2 336    |
| 40                                | 41,7                                 | 41,5     | 2 689   | 2 124    |
| 50                                | 45,3                                 | 45       | 2 478   | 1 961    |
| 60                                | 48,6                                 | 48,2     | 2 309   | 1 829    |
| 70                                | 51,7                                 | 51,3     | 2 169   | 1 720    |
| 80                                | 54,7                                 | 54,2     | 2 050   | 1 627    |
| 90                                | 57,6                                 | 57       | 1 948   | 1 548    |
| 100                               | 60,4                                 | 59,7     | 1 859   | 1 478    |
| 110                               | 63,1                                 | 62,3     | 1 780   | 1 415    |
| 120                               | 65,7                                 | 64,8     | 1 710   | 1 360    |
| 130                               | 68,2                                 | 67,3     | 1 646   | 1 311    |

установки буде становити 3,95 млн м<sup>3</sup> та 3,1 млн м<sup>3</sup> відповідно. Інакше за завантаження автосамоскидів на рівні установки екскаваторів та куті повороту  $\varphi = 90^\circ$  продуктивність драглайнів зменшується вдвічі.

На основі розрахунків отримано графік залежності річної експлуатаційної продуктивності екскаваторів від кута повороту навантаження (рис. 1).

Отримані залежності підтвердили, що за однакового кута повороту та приблизно однакового часу циклу повороту у ЕШ-14/50 річна експлуатаційна продуктивність буде вища, ніж у ЕШ-11/70.

Для подальшого вдосконалення роботи гірничотранспортного обладнання розглянемо впроваджену на Єристівському кар'єрі АСУ "WENCO", що є багатофункціональною та охоплює всі основні процеси організації та управління гірничо-транспортним обладнанням і роботою кар'єру загалом. Впровадження системи підняло на вищий рівень організацію виробництва та управління гірничотранспортним комплексом за рахунок підвищення якості та оперативності отримання інформації, виявлення порушень, автоматизувало управління розподілом самоскидів, що дало змогу підвищити своєчасність та обґрунтованість прийняття рішень з управління процесами, підвищити швидкість та точність виконання технологічних операцій.

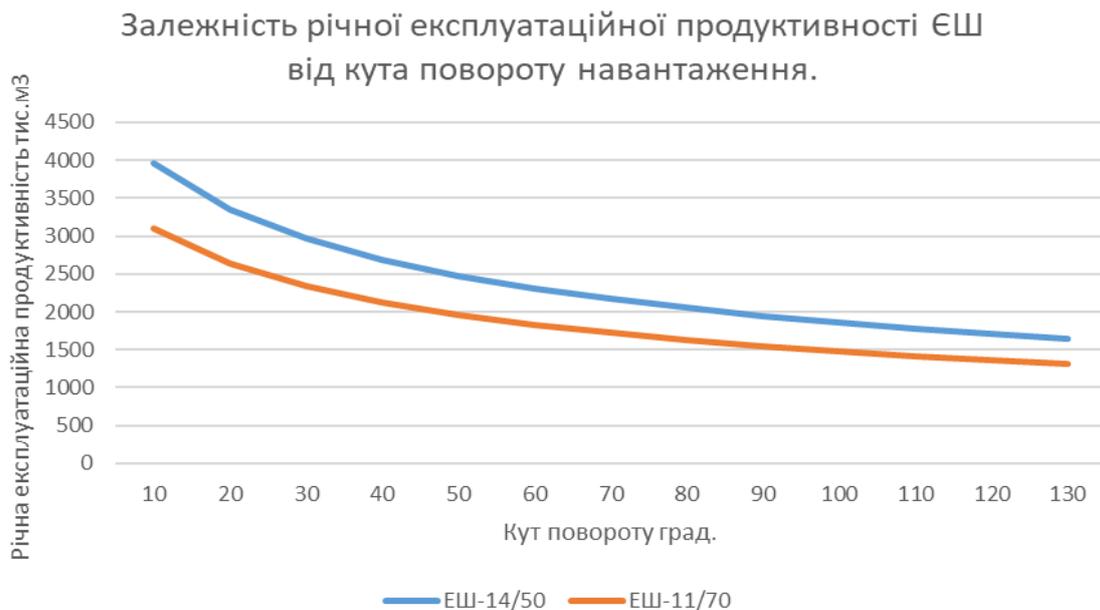
Впровадження системи розширило склад та якість засобів (інструментів) контролю та

управління гірничотранспортними роботами. Використання технічних та програмних засобів систем забезпечило можливість здійснювати централізований, оперативніший і суворіший контроль над технологічними процесами [5]. Оперативний інструментальний контроль дав можливість підвищити технологічну та виробничу дисципліну, покращити організацію та безпеку робіт. Це підвищило ефективність виконання технологічних операцій та привело до покращення технологічних параметрів ведення робіт.

В результаті за період впровадження "WENCO" підвищилась ефективність використання гірничої та транспортної техніки. Вперше на 20...30% знизився час простою автосамоскида біля вантажної техніки. За ступенем збільшення парку автосамоскидів ефект від зменшення часу простоїв проявляється все більше.

Встановлено, що на 2...3% підвищилося середнє завантаження самоскидів, знизився розкид обсягу завантаження, зменшилися випадки недовантажень та перевантажень самоскидів. Використання системи "WENCO" дало змогу збільшити кількість навантажених автосамоскидів САТ 789С вантажопідйомністю 180 тонн на 1042 одиниці за рік за рахунок зростання швидкості навантаження екскаватором Висурус RH-200.

У статті детально проаналізовано роботу екскаваторно-автомобільного комплексу Єристівського кар'єру. Аналіз виробничої потужності дав змогу виявити потенціал для її збільшення. Покращення показників роботи



**Рис. 1. Залежність річної експлуатаційної продуктивності ЄШ від кута повороту навантаження**

екскаваторно-автомобільного комплексу вбачається у зменшенні кута повороту екскаватора під час навантаження та використанні схеми з нижнім завантаженням. Проаналізовано роботу драглайна та доведено, що час циклу за куту повороту від 20° до 30° та завантаження автосамоскиду, що розташований нижче за рівень стояння екскаватора, буде найменшим, річна продуктивність драглайну буде найвищою, а двостороннє завантаження – продуктивнішим, хоча й складнішим у реалізації.

Встановлено, що зменшити негативний вплив організаційних факторів можна шляхом впровадження новітніх інформаційних систем. Так, проаналізовано позитивний досвід використання АСУ "WENCO" на Єристівському кар'єрі. Таким чином, завдяки швидкій адаптації виробничої системи до актуальних проблем у роботі виймально-навантажувального обладнання і транспорту вдалося покращити показники його роботи і знизити собівартість видобутку руди відкритим способом.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Hendricks C., Peck J., Scoble M. Machine performance monitoring in surface mines. *Mining Engineering*. 1992. Vol. 44, no. 3. P. 243–250.
2. Osanloo M., Hekmat A. Prediction of shovel productivity in the Gol-e-Gohar iron mine. *Journal of Mining Science*. 2005. Vol. 41, no. 2. P. 177–184.
3. Ercelebi S.G., Bascetin A. Optimization of shovel-truck system for surface mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009. Vol. 109, no. 7. P. 433–439.
4. Fujita K., Yasuda T., Imaie K. Ultra large hydraulic excavators and dump trucks for large open-pit mines. *Hitachi Review*. 2011. Vol. 60, no. 5. P. 267–271.
5. Nel S., Kizil M.S., Knights P. Improving truck-shovel matching. *35<sup>th</sup> APCOM Symposium: Wollongong, NSW, 2011*. P. 381–391.
6. Kirmanli C., Erceleni S.G. An expert system for hydraulic excavator and truck selection in surface mining. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009. Vol. 109, no. 12. P. 727–739.
7. Vemba M.M.D.S. Loading and transport system at SMC-optimization. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004. Vol. 104, no. 3. P. 139–147.
8. Technology improves shovel productivity. *Engineering and mining journal*. 2018. Vol. 219, no. 5. P. 46–49. URL: <https://www.e-mj.com/flipbooks/may-2018-2/?showpage=48>.

#### REFERENCES:

1. Hendricks C., Peck J., Scoble M. (1992). Machine performance monitoring in surface mines. *Mining Engineering*. 44 (3), 243–250.
2. Osanloo M., Hekmat A. (2005). Prediction of Shovel Productivity in the Gol-e-Gohar Iron Mine. *Journal of Mining Science*, 41 (2), 177–184.
3. Ercelebi S.G., Bascetin A. (2009). Optimization of shovel-truck system for surface mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 109 (7), 433–439.
4. Fujita K., Yasuda T., Imaie K. (2011). Ultra large hydraulic excavators and dump trucks for large open-pit mines. *Hitachi Review*. 60 (5), 267–271.
5. Nel S., Kizil M.S., Knights P. (2011). Improving truck-shovel matching. *35<sup>th</sup> APCOM Symposium: Wollongong, NSW*. 381–391.
6. Kirmanli C., Erceleni S.G. (2009). An expert system for hydraulic excavator and truck selection in surface mining. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 109 (12), 727–739.
7. Vemba M.M.D.S. (2004). Loading and transport system at SMC-optimization. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 104 (3), 139–147.
8. Engineering and mining journal (2018). *Technology Improves Shovel Productivity* [online], no. 5. Retrieved from: <https://www.e-mj.com/flipbooks/may-2018-2/?showpage=48>.

УДК 622.063.23, 666.9.015

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-14>

## СПРЯМОВАНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД НЕВИБУХОВИМИ РУЙНУЮЧИМИ СУМІШАМИ

**Сахно Іван Георгійович,**

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-8592-0572

**Сахно Світлана Володимирівна,**

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3917-9143

Руйнування міцних гірських порід є одним з основних процесів у сучасній гірничодобувній промисловості. Найбільш поширеним способом руйнування скельних і напівскельних гірських порід з міцністю по шкалі проф. Протодіяконова більше 6 од. є вибуховий спосіб. Вибухове руйнування пов'язано з численними шкідливими впливами на гірський масив і довкілля. Окрім цього, ведення вибухових робіт пов'язано з ризиками пошкодження обладнання, приладів, комунікацій, які перебувають у зоні впливу вибухових робіт. Іноді вибухове руйнування не може бути використано через обмеження пило газозового режиму або з інших питань безпеки. Екологічною альтернативою традиційним вибуховим методам руйнування міцних гірських порід є невибухові технології. Серед різних методів невибухового руйнування перспективним є метод, що базується на використанні невибухових руйнуючих сумішей. Невирішеним питанням невибухового руйнування гірських порід є спрямоване руйнування в заданих напрямках. Керування напрямком руйнування ведеться переважно за рахунок оптимізації схеми розташування шпурів. При цьому не враховуються природні дефекти, ослаблення і структурні неоднорідності гірських порід. Внаслідок цього спостерігається «ухил» тріщин від проектного напрямку. Існують технічні рішення, що спрямовані на усунення наявних недоліків спрямованого невибухового руйнування, що ґрунтуються на використанні шпурових вставок і патронів. У статті розглянуто метод спрямованого руйнування гірських порід, який базується на створенні концентраторів розтягуючих напружень на поверхні шпура в необхідних місцях. Розглянуто вплив додаткового встановленого в шпур патрона невибухової руйнуючої суміші на поле напружень поблизу шпура. Запропоновано модифіковану конструкцію патрона невибухової руйнуючої суміші, що дає змогу керувати напрямком руйнування гірських порід під час коригування траєкторії руйнування, яка може бути непрямою лінією.

**Ключові слова:** невибухова руйнуюча суміш, спрямоване руйнування порід, концентрації напружень, патрон невибухової руйнуючої суміші, траєкторія руйнування порід, керування руйнуванням порід.

### **Sakhno Ivan, Sakhno Svitlana. Directional explosive-free breakage of rock by soundless chemical demolition agents**

The hard rocks breakage is one of the main processes in the modern mining and mineral recovery industry. The most common method breakage of hard rock's with strength according to the scale of Prof. Protodiakonov more than 6 units, there is an explosive. Explosive breakage is associated with numerous harmful effects on the rock mass and the environment. In addition, conducting blasting operations is associated with risks of damage to equipment, devices, and communications located in the zone of impact of blasting. In some cases, explosive destruction cannot be used due to limitations of the dust-gas regime or other safety issues. Explosive-free technologies are an ecological alternative to traditional explosive methods of hard rock breakage. Among the various methods of explosive-free breakage, the method based on the use of soundless chemical demolition agents is promising. An unsolved issue of explosive-free rock breakage is directional fracturing. Control of the breakage direction is carried out mainly due to the optimization of the borehole's layout. At the same time, natural defects, weakening and structural heterogeneities of rock mass are not taken into account. As a result, a "slope" of cracks from the design direction is observed. There are technical solutions aimed at eliminating the existing disadvantages of directed non explosive-free breakage based on the additional installation in the borehole cartridges. This paper discusses the method of directional fracturing of rocks, which is based on the creation of tensile stress concentrators on the borehole surface in the necessary places. The impact of an additional soundless chemical demolition agent cartridge installed in the borehole on the stress field nearby the borehole is considered. A modified design of the explosive-free cartridge is proposed, which allows to control the direction of rock breakage while adjusting the path of fracturing, which may not be a straight line.

**Key words:** soundless chemical demolition agent, direction rock breakage, stress concentrations, cartridge of soundless chemical demolition agent, trajectory of rock fracturing, rock breakage control.

Руйнування гірських порід є одним з основних процесів у сучасній гірничодобувній промисловості. Найпоширенішим способом руйнування міцних гірських порід (з міцністю більше 6 од. по шкалі проф. Протодіяконова) є вибуховий спосіб. Руйнування гірських порід вибухом пов'язано з численними шкідливими впливами на навколишній масив і середовище, такими як вібрація, утворення пилу, розвиток природної тріщинуватості і ослаблення порід [1]. До того ж ведення вибухових робіт пов'язано з ризиками пошкодження обладнання, приладів, комунікацій, які перебувають у зоні впливу вибухових робіт. Тому розроблення та застосування більш екологічних і нединамічних методів руйнування міцних порід як альтернативи вибуховому руйнуванню порід є актуальними завданнями. Цією альтернативою є використання невибухових руйнуючих сумішей (НРС), які широко застосовуються для руйнування скельних порід або бетонних конструкцій, проведення виробок та нетрадиційних способів розвідки газу.

НРС – це порошкоподібна речовина, яка має тенденцію до об'ємного розширення під час гідратації за рахунок утворення гідроксиду кальцію або етрінгіту. Тиск розширення НРС залежить від діаметра отвору, вмісту води, температури довкілля, властивостей породи і може перевищувати 50–80 МПа. Основними характеристиками НРС, що визначають ефективність його використання в гірництві, є розширювальний тиск, час руйнування, стійкість до різних температур і води. На це спрямовані основні зусилля вчених.

Розширення НРС зумовлене гідратацією СаО [2; 3]. Таким чином, тиск розширення НРС прямо пропорційний вмісту СаО в суміші. Проте спроби збільшити величину розширювального тиску та швидкість його генерації за рахунок збільшення частки СаО виявились неефективними. Наслідком збільшення частки СаО в суміші є неконтрольоване підвищення температури, википання хімічно не зв'язаної води із суміші та викид НРС зі шпуру [3; 4].

Багато досліджень показали, що співвідношення води та НРС обернено пропорційне значенню та швидкості створення тиску розширення, тоді як вища температура довкілля приводить до раннього та більшого тиску розширення [5]. Проте регулювання швидкості утворення розширювального тиску та його величини шляхом нагрівання води (перед змішуванням) або суміші НРС неефективно, оскільки призводить до неконтрольованого збільшення тепла та викиду НРС зі шпуру. Причиною цього явища є екзотермічний тип реакції гідратації СаО.

Сьогодні очевидно, що для підвищення швидкості створення експансивного тиску без викиду НРС зі свердловини необхідно відкоригувати систему НРС, які виготовляються шляхом змішування з іншими цементуючими сумішами. Як прискорювачі запропоновано численні добавки, такі як гідроксиди лугів, силікати, фторосилікати, органічні сполуки, які по-різному впливають на процес гідратації в'язучих. Dessouki та ін. [6] пропонують прискорити швидкість об'ємного розширення НРС шляхом додавання 15%  $\text{CaSO}_4$ . De Silva та ін. [7] запропонували додати домішку для підвищення в'язкості (VEA) для покращення стійкості до вимивання модифікованого НРС, який можна ефективно використовувати у підводних умовах. Maneepoi та ін. [8] показали, що додавання 4% мас.  $\text{MgCl}_2$  і 3% мас.  $\text{CaCl}_2$  прискорило початок руйнування на 47,4% і 61,2% відповідно.

У згаданих дослідженнях значні позитивні результати були отримані в галузі вивчення та модифікації властивостей НРС. Проте механізм руйнування та оптимальні параметри руйнування ще потребують подальшого вивчення для підвищення ефективності невибухового руйнування. Основними параметрами технології невибухового руйнування є діаметр шпурів та відстань між ними. Більшість дослідників і виробників НРС рекомендує використовувати діаметри шрупів в діапазоні від 30 до 60 мм. Для розрахунку відстані між шпурами отримані емпіричні співвідношення та рівняння на основі механіки суцільного середовища.

Зусилля щодо контролю процесу руйнування також були зосереджені переважно на оптимізації схеми розташування шпурів. Наприклад, Narada [2] рекомендував гексагональний тип схеми шпурів для оптимізації щільності тріщинуватості породи. Така оптимізація зазвичай полягає в досягненні максимального руйнування мінімальною кількістю шпурів. При цьому спрямоване руйнування, яке є досить актуальним для видобутку корисних копалин, практично не досліджується. Ідея використання НРС для спрямованого руйнування порід полягає в тому, щоб контролювати ініціацію та поширення тріщин. На відміну від інших методів руйнування, які утворюють численні радіальні тріщини, НРС зазвичай створюють три або рідко чотири тріщини навколо шпуру. Однак НРС може створити й одну або дві тріщини з необхідною орієнтацією, якщо контролювати цей процес.

Бажане поширення мережі тріщин зазвичай досягається зміною розміру та відстані між шпурами та їх розташуванням. У процесі гідратації НРС створюється рівномірний тиск

на внутрішню поверхню шпура в усіх напрямках. У цьому випадку місця зародження тріщин і їх поширення визначаються властивостями порід і їх неоднорідністю, які мають випадковий характер. Тому важко виключити небажану тріщинуватість за напрямками, які не збігаються з необхідними. При цьому можлива поява на поверхні шпура додаткових тріщин, які не збігаються з необхідним напрямком.

У дослідженні запропоновано спосіб невибухового спрямованого руйнування порід. Запроваджено принцип направленої руйнування породи за рахунок використання патрона НРС, що дає можливість керованого спрямованого руйнування.

Принцип спрямованого руйнування породи за допомогою НРС.

Об'ємний тиск розширення НРС створює рівновелике поле напружень в навколошпуровій ділянці за традиційного способу використання НРС – заливки в шпур. У такому випадку в зоні контакту з поверхнею шпура порода стискається. Однак, оскільки розширення НРС призводить до збільшення діаметра шпура, навколо нього виникають напруження розтягування (рис. 1а). Коли напруження розтягування перевищує міцність гірських порід на розрив, виникають тріщини. Вони є результатом розтягуючих напруг, спрямованих під прямим кутом до тріщини. Напруження стиску, розташовані паралельно тріщині, не мають суттєвого впливу на руйнування, оскільки міцність гірських порід на стиск значно перевищує міцність

на розтягування, а швидкість трансформації напружень низька (рис. 1а). У випадку одиночного шпура місце зародження тріщини визначається відстанню до вільної поверхні, неоднорідностями породи, прихованими тріщинами та дефектами. У випадку двох або більше шпурів тріщини виникають і поширюються між ними, якщо відстань між отворами розрахована правильно і в породі немає дефектів.

Ідея методу спрямованого руйнування, удосконалення якого наведено в роботі, полягає у штучному створенні концентраторів розтягуювальних напружень на поверхні шпура в необхідному місці. Реалізація цієї ідеї здійснюється шляхом додаткової установки в шпур патрона з НРС, розміщеним всередині патрона, як показано на рис 1б.

Сьогодні відомий метод спрямованого руйнування, у якому патрон складається з двох елементів. Кожен елемент являє собою половину сталеві труби із зовнішнім діаметром, рівним діаметру шпура, отриману поздовжнім розрізом [9; 10]. Під час використання такого патрона тиск НРС створює підвищені напруження розтягування в одному з діаметральних напрямків шпура, що збігається із зазором патрона. Водночас в інших напрямках патрон захищає від виникнення високих розтягуювальних напружень біля поверхні шпура (рис. 1б). Концентрації напружень розтягування є місцями зародження тріщин у породі. Коли напруження розтягування перевищує міцність породи на розрив, тріщина зароджується в необхідному напрямку.

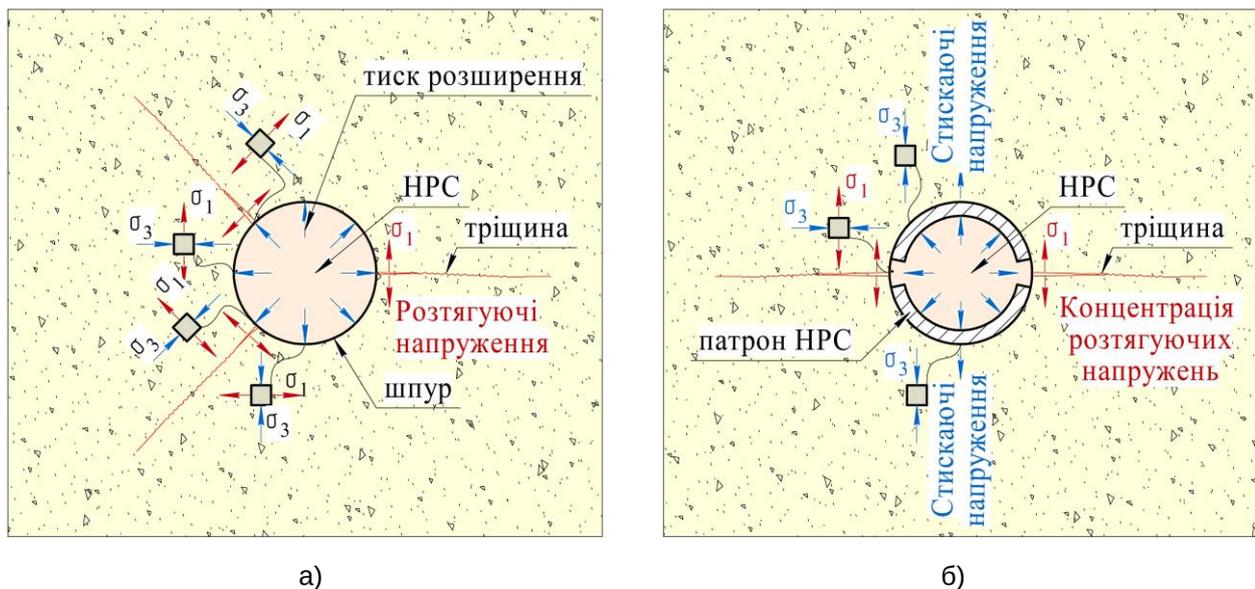


Рис. 1. Механізм руйнування за допомогою НРС: (а) некероване руйнування НРС; (б) спрямоване руйнування НРС

Поширення тріщини забезпечується впливом розтягувальних напружень під час розширення НРС. Таким чином, забезпечується направлений розрив породи.

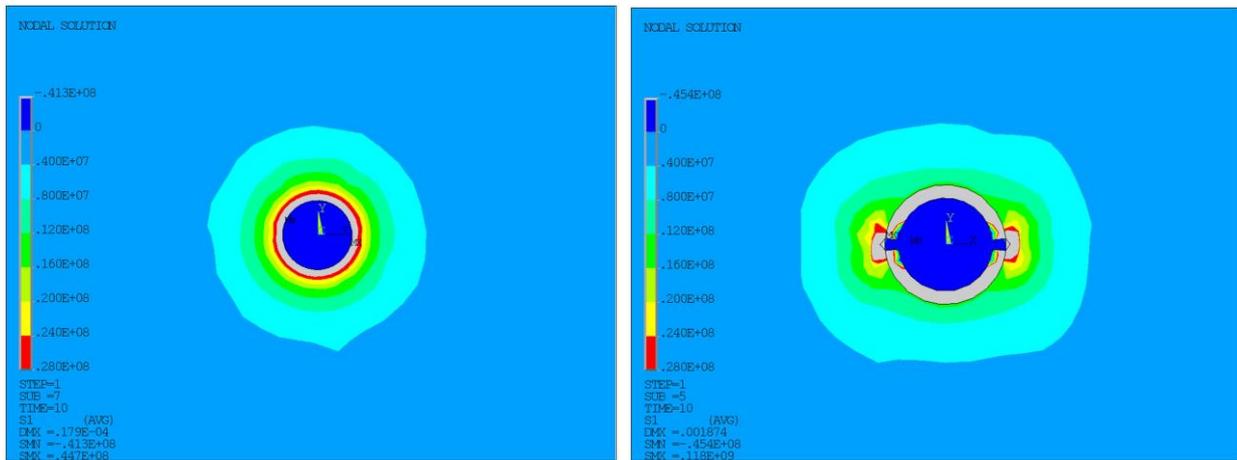
Підтвердженнями наведеному механізму є результати чисельного моделювання. Розподіл максимальних головних напружень на контурі шпура за традиційного варіанта використання НРС і з використанням патрону наведено на рис. 2. Тиск саморозширення НРС під час моделювання складав 45 МПа.

Аналіз результатів моделювання свідчить про те, що, на відміну від рівномірного поля напружень, що виникає у навколошпуровій ділянці після заливки НРС (рис. 2а), після використання патрону формуються концентрації напружень, що перевищують межу міцності порід у декілька разів (рис. 3б).

Описаний спосіб досліджено у лабораторних умовах, а також підтверджено результатами випробування в реальних виробничих умовах.

Лабораторні експерименти з руйнування за допомогою НРС були проведені на пінобетонних плитах (розміри 200 × 150 × 70 мм) зі шпуром 12 мм у центрі. В половину шпурів заливали НРС (рис. 2а), а в другу половину додатково встановлювали патрони з металопластикової труби, діаметрально розрізаної по поздовжній осі (рис. 3б). Патрони встановлювалися таким чином, щоб зазори були орієнтовані по довгій стороні пластини, щоб виключити випадковість результату.

Результати випробувань підтвердили ефективність використання патронів. У тих плитах, у яких не були встановлені патрони, зароджувалися і поширювалися, як правило, три тріщини,



а)

б)

Рис. 2. Розподіл максимальних головних напружень навколо шпура за традиційного руйнування НРС (а) і за використання патрона (б)



а)

б)

Рис. 3. Руйнування невибуховими руйнуючими сумішами: (а) традиційний метод заливкою НРС в шпур; (б) метод спрямованого руйнування з використанням патронів НРС

як показано на рис. 3а. Тріщини були випадково орієнтовані. У разі встановлення патрона плита руйнувалась в напрямку, що збігається із зазором патрона, як показано на рис. 3б.

Однак практичне використання розробленого авторами способу спрямованого руйнування показало, що наведене технічне рішення має недоліки. Патрон не дає змоги створювати спрямоване руйнування в напрямку, що не збігається з діаметральним, тому неможливо забезпечити руйнування по ламаній лінії. Це обумовлено діаметральною орієнтацією прорізів у патроні. Окрім того, оскільки патрон містить тільки два прорізи і обидва вони орієнтовані вздовж однієї прямої, неможливо створити руйнування по більш ніж одній лінії. Під час використання описаного патрона керування напрямком руйнування обмежено магістральною тріщиною. Тому метою подальших досліджень є вдосконалення наведеного способу спрямованого руйнування.

Відомі пристрої для спрямованого руйнування [9] не забезпечують досягнення наведеного технічного результату. Під час реалізації відомого пристрою рівномірний тиск, який виникає всередині патрона в процесі саморозширення НРС, передається на стінки шпуру через оболонки патрона, а в місцях, що збігаються з подовжніми розрізами в патроні, виникають зони концентрації розтягувальних напружень. Ці зони є місцями зародження тріщин і подальшого руйнування матеріалу. Оскільки розрізи у відомому патроні розташовані діаметрально, концентрації розтягувальних напружень виникають лише в діаметральному напрямку біля розрізів. Це не дає змоги керувати напрямком руйнування порід, якщо необхідна лінія руйнування є ламаною або потрібно створити більше однією магістральною тріщиною.

В основу запропонованого патрону НРС покладено завдання удосконалення патрона невибухової руйнуючої суміші, в якому за рахунок зміни форми конструктивних елементів та їх кількості забезпечується керування розподілом напружень навколо шпуру і створення концентраторів розтягувальних напружень в необхідних напрямках, що дає змогу досягти надійного направленного руйнування матеріалів по траєкторії, яка не обмежується прямою лінією, або по різних траєкторіях, а також приводить до спрощення виготовлення патронів.

Поставлене завдання вирішується тим, що в патроні невибухової руйнуючої суміші, що містить водонепроникну оболонку, виготовлену з труби, усередину якої поміщена невибухова руйнуюча суміш, водонепроникна оболонка

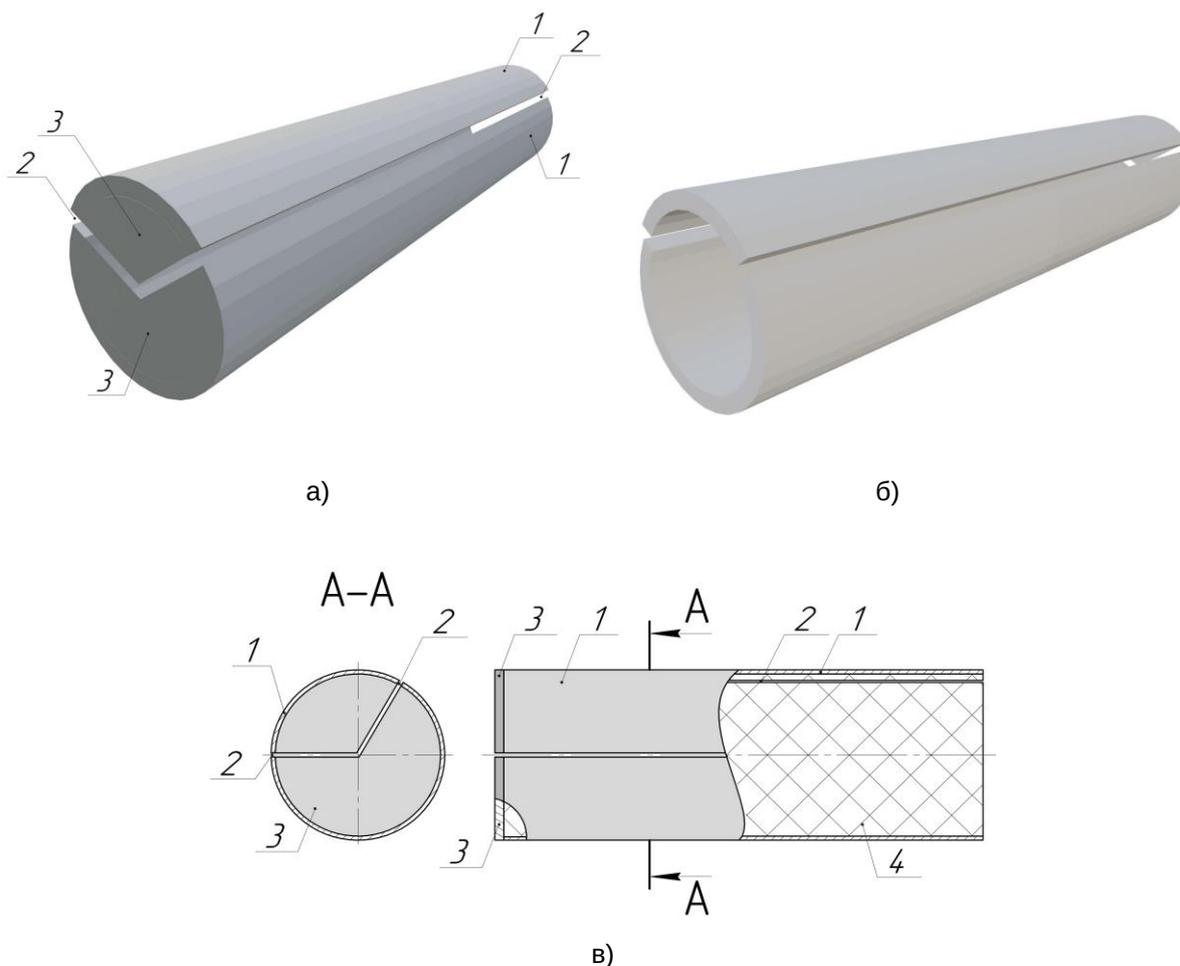
патрона виконана не менш ніж з двох частин труби, отриманих поздовжніми прорізами, які мають один глухий торець.

Виконання водонепроникної оболонки патрона НРС не менш ніж з двох частин труби, отриманих поздовжніми прорізами, забезпечує утворення навколо шпуру нерівномірного поля напружень, що виникає внаслідок саморозширення НРС всередині патрона, з формуванням у місцях, що збігаються з прорізами в патроні, концентрацій розтягувальних напружень, ріст яких призводить до зародження тріщин і руйнування матеріалу в необхідному напрямку або напрямках. Оскільки положення прорізів не обмежено діаметральним напрямком, за допомогою патрону може бути досягнуто руйнування матеріалу по необхідній нелінійній траєкторії, а також створення в необхідних напрямках більше однієї тріщини. Це дає змогу досягти надійного направленного руйнування матеріалів по траєкторії, яка не обмежується прямою лінією. На рис. 4 (а, б) наведено загальний вигляд патрона НРС в ізометрії. Поперечний і подовжній перетини патрона наведено на рис. 4в.

Розроблений патрон НРС працює таким чином. У гірській породі пробурюють шпури, глибина, діаметр і розташування яких визначаються розрахунковою схемою. Наружний діаметр патрону невибухової руйнуючої суміші узгоджується з діаметром шпуру, а саме має бути на 1–3 мм менше діаметра шпуру. Для пропонуваніх патронів доцільно використовувати невибухові руйнуючі суміші на основі грубо молотого вапна.

У змішувальній ємності перемішуються компоненти невибухової руйнуючої суміші 4. Елементи патрона, що являють собою водонепроникні оболонки 1, з'єднуються й фіксуються між собою кріпильною стрічкою. Приготована пластикна суміш 4 поміщається всередину порожнини патрона, що утворилась з'єднаними водонепроникними оболонками 1. Зібраний у такий спосіб патрон поміщують у шпур таким чином, щоб діаметральні прорізи 2 збігалися з необхідними напрямками руйнування матеріалу, що визначені проєктною траєкторією руйнування. За розміщення патрона у висхідних шпурах його додатково фіксують за допомогою розпорних пристроїв, наприклад клинів. Зазначені операції повторюються у всіх шпурах.

Саморозширення НРС 4 в процесі її гідратації створює внутрішній тиск на водонепроникні оболонки 1, що спричиняє тиск оболонок на стінки шпуру. Водонепроникні оболонки переміщуються, в результаті чого зазори між ними, в місцях прорізів 2, збільшуються. Внаслідок



**Рис. 4. Патрон НРС в ізометрії (а, б), поперечний і подовжній перетини (в)**

Примітка: 1 – водонепроникна оболонка з частин труби; 2 – подовжні прорізи; 3 – глухий торець патрона; 4 – невибухова руйнуюча суміш

цього в навколошпуровій області матеріалу, що руйнується, формується нерівно компонентне поле напружень з концентраціями розтягувальних напружень вздовж прорізів 2 патрона НРС. Після перевищення розтягувальними напруженнями межі міцності матеріалу на розтягання відбувається розрив міжатомних зв'язків і утворення тріщин, орієнтація яких збігається з напрямками прорізів 2 у патроні НРС. Розкриття і ріст тріщин призводить до руйнування матеріалу за проектною траєкторією або траєкторіями.

В роботі запропоновано модифікований патрон НРС, робота якого дає змогу забезпечити керування розподілом напружень навколо шпуру з моменту розширення НРС, що дає можливість досягти надійного направленої руйнування матеріалів по траєкторії, яка не обмежується прямою лінією, або по різних траєкторіях. Подальші дослідження будуть спрямовані на обґрунтування параметрів способу руйнування гірських порід з використанням розробленого патрона, лабораторні і виробничі випробування.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Dai Y., Khandelwal M., Qiu Y., Zhou J., Monjezi M., Yang P. A hybrid metaheuristic approach using random forest and particle swarm optimization to study and evaluate backbreak in open-pit blasting. *Neural Comput Appl.* 2022. № 34. P. 6273–6288. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06776-z>.
2. Harada T., Soeda K., Idemitsu T., Watanabe A. Characteristics of expansive pressure of an expansive demolition agent and the development of new pressure transducers. *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers.* 1993. № 478. P. 95–109. DOI: [https://doi.org/10.2208/jscej.1993.478\\_91](https://doi.org/10.2208/jscej.1993.478_91).

3. Natanzi A.S., Laefer D.F., Connolly L. Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents. *Constr Build Mater.* 2016. № 110. P. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.016>.
4. Hinze J., Brown J. Properties of Soundless Chemical Demolition Agents. *J Constr Eng Manag.* 1994. № 120 (4). P. 816 DOI: 827. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1994\)120:4\(816\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1994)120:4(816)).
5. Laefer D., Natanzi A., Zolanvari S. Impact of thermal transfer on hydration heat of a soundless chemical demolition agent. *Constr Build Mater.* 2018. № 187. P. 348–359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.168>.
6. Dessouki A., Mitri H. Rock Breakage Using Expansive Cement. *Engineering.* 2011. № 3 (2). P. 168–173. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2011.32020>.
7. De Silva V.R.S., Ranjith P.G., Perera M.S.A., Wu B., Rathnaweera T.D. The influence of admixtures on the hydration process of soundless cracking demolition agents (SCDA) for fragmentation of saturated deep geological reservoir rock formations. *Rock Mech Rock Eng.* 2019. № 52. P. 435–454. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1596-9>.
8. Maneenoi N., Bissen R., Chawchai S. Influence of admixtures on the performance of soundless chemical demolition agents and implications for their utilization. *J Sustain Min.* 2022. № 21 (2). P. 3. DOI: <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1350>.
9. Пат. вин. № 100062, МПК (2006.01) E21C 37/06 Спосіб руйнування гірських порід невибуховими руйнуючимим складами й патрон для його реалізації / І.Г. Сахно, М.М. Касьян (Україна). а2011 00476; заявл. 17.01.2011, опубл. 12.11.2012, бюл. № 21. 5 с.
10. Sakhno S., Kobylanskyi B., Sakhno I. Destruction of rocks by the non-explosive depleting compounds during mining. *Mining of Mineral Deposits.* 2016. № 10 (1). P. 25–30. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.01.025>.

#### REFERENCES:

1. Dai, Y., Khandelwal, M., Qiu, Y., Zhou, J., Monjezi, M., Yang, P. (2022). A hybrid metaheuristic approach using random forest and particle swarm optimization to study and evaluate backbreak in open-pit blasting. *Neural Comput Appl.*, 34, P. 6273–6288. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06776-z>.
2. Harada, T., Soeda, K., Idemitsu, T., Watanabe, A. (1993). Characteristics of expansive pressure of an expansive demolition agent and the development of new pressure transducers. *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 478, P. 95–109. [https://doi.org/10.2208/jscej.1993.478\\_91](https://doi.org/10.2208/jscej.1993.478_91).
3. Natanzi, A.S., Laefer, D.F., Connolly, L. (2016). Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents. *Constr Build Mater.*, 110, P. 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.016>.
4. Hinze, J., Brown, J. (1994). Properties of Soundless Chemical Demolition Agents. *J Constr Eng Manag.*, 120 (4), P. 816–827. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1994\)120:4\(816\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1994)120:4(816)).
5. Laefer, D., Natanzi, A., Zolanvari, S. (2018). Impact of thermal transfer on hydration heat of a soundless chemical demolition agent. *Constr Build Mater.*, 187, P. 348–359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.168>.
6. Dessouki, A., Mitri, H. (2011). Rock Breakage Using Expansive Cement. *Engineering*, 03 (02), P. 168–173. <https://doi.org/10.4236/eng.2011.32020>.
7. De Silva, V.R.S., Ranjith, P.G., Perera, M.S.A., Wu, B., Rathnaweera T.D. (2019). The influence of admixtures on the hydration process of soundless cracking demolition agents (SCDA) for fragmentation of saturated deep geological reservoir rock formations. *Rock Mech Rock Eng.*, 52, P. 435–454. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1596-9>.
8. Maneenoi, N., Bissen, R., Chawchai, S. (2022). Influence of admixtures on the performance of soundless chemical demolition agents and implications for their utilization. *J Sustain Min.*, 21 (2), P. 3. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1350>.
9. Sakhno, I., Kasyan, M. (2006). *The method of destruction of rocks by non-explosive destructive compositions and a cartridge for its implementation* (UA. Patent No. 100062). Ukrpatent.
10. Sakhno, S., Kobylanskyi, B., Sakhno, I. (2016). Destruction of rocks by the non-explosive depleting compounds during mining. *Mining of Mineral Deposits*, 10 (1), 25–30. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.01.025>.

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 331.45

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-15>

### ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ З ПОЛІПШЕННЯ УМОВ ПРАЦІ (НА ПРИКЛАДІ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ ЗАПИЛЕНОСТІ)

**Кружилко Олег Євгенович,**

доктор технічних наук,

професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-8624-1515

**Чеберячко Сергій Іванович,**

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля,

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3281-7157

**Подкопаєв Сергій Вікторович,**

доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

ORCID ID: 0000-0002-3258-9601

**Володченкова Наталія Валеріївна,**

кандидат технічних наук, доцент,

в.о. декана гірничо-металургійного факультету,

завідувачка кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-4617-7285

**Бехтер Олександр Анатолійович,**

директор

ПРАТ «ЗАПОРІЖКОКС»

ORCID ID: 0009-0005-6809-2022

*У статті проаналізовано проблематику обґрунтування заходів з охорони праці на основі даних системи виробничого моніторингу. Відзначено, що законодавство України покладає на роботодавця відповідальність за створення на робочих місцях підприємства умов праці, що відповідають чинним нормативно-правовим актам, що зумовлює зацікавленість керівників підприємств у поліпшенні умов праці на робочих місцях. Функціонування системи управління охороною праці – це процес підготовки, прийняття та реалізації управлінських рішень щодо забезпечення здорових і безпечних умов праці на підприємствах, а зазначені рішення можуть бути спрямовані на реалізацію організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів. Одним з напрямів удосконалення управління охороною праці є раціональне використання даних про фактичні рівні виробничих факторів, отриманих в результаті моніторингу. Такий підхід спрямований на завчасне виявлення та оцінювання фактичних рівнів шкідливих факторів з подальшим формуванням заходів з попередження впливу цих факторів на працюючих. Запропоновано підхід до обґрунтування заходів з поліпшення умов праці, особливістю якого є зіставлення очікуваних результатів від вжиття заходів з урахуванням обсягами фінансових коштів, необхідних для їх впровадження. Цей підхід дає змогу кількісно оцінити результати реалізації альтернативних варіантів заходів з охорони праці та обґрунтувати доцільність їх фінансування. Апробацію підходу проведено на прикладі дослідження запиленості на робочому місці колія плит та блоків кар'єру з видобутку граніту. Проаналізовано різні варіанти технологічного процесу, що характеризуються певними режимами роботи витяжної вентиляції. Як перспективний напрям розвитку цього підходу може бути запропоновано використання методів математичного моделювання, експертних оцінок та теорії прийняття рішень.*

**Ключові слова:** умови праці, моніторинг, шкідливий фактор, запиленість.

**Kruzhilko Oleg, Cheberyachko Serhii, Podkopaiev Serhii, Volodchenkova Nataliia, Bekhter Oleksandr. Justification of measures to improve working conditions (on the example of dust monitoring data)**

*The article analyzes the problems of substantiating labor protection measures based on the data of the production monitoring system. It was noted that the legislation of Ukraine imposes on the employer the responsibility for creating working conditions at the workplaces of the enterprise that correspond to the current legal acts, which causes the interest of the managers of enterprises in improving the working conditions at the workplaces. The functioning of the occupational health and safety management system is a process of preparation, adoption and implementation of management decisions to ensure healthy and safe working conditions at enterprises, and these decisions can be aimed at the implementation of organizational, technical, sanitary-hygienic and medical-preventive measures. One of the areas of improving labor protection management is the rational use of data on the actual levels of production factors obtained as a result of monitoring. This approach is aimed at early identification and assessment of the actual levels of harmful factors, followed by the formation of measures to prevent the impact of these factors on workers. An approach to the justification of measures to improve working conditions is proposed, the feature of which is the comparison of the expected results from the implementation of the measures, taking into account the amount of financial resources necessary for their implementation. This approach makes it possible to quantitatively evaluate the results of the implementation of alternative options for labor protection measures and justify the feasibility of their financing. Approbation of the specified approach was carried out on the example of a study of dustiness at the workplace of a track of slabs and blocks of a quarry for granite mining. Various variants of the technological process, characterized by different operating modes of exhaust ventilation, were analyzed. The use of mathematical modeling methods, expert evaluations, and decision-making theory can be proposed as a promising direction for the development of this approach.*

**Key words:** working conditions, monitoring, harmful factor, dustiness.

**Вступ.** Законодавство України покладає на роботодавця відповідальність за створення на робочих місцях підприємства умов праці, що відповідають чинним нормативно-правовим актам [1]. Статтею 13 Закону України «Про охорону праці» передбачено впровадження та забезпечення в подальшому функціонування системи управління охороною праці (СУОП) на підприємствах. Роботодавець створює службу охорони праці та призначає посадових осіб, які забезпечують вирішення конкретних питань охорони праці.

Функціонування СУОП можна розглядати як процес підготовки, прийняття та реалізації управлінських рішень щодо забезпечення здорових і безпечних умов праці на підприємствах. Ці рішення можуть бути спрямовані на життя організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на дотримання нормативно-правових актів та вимог законодавства з охорони праці.

Сьогодні однією з проблем у сфері охорони праці залишається недосконалість нормативно-правової та нормативно-технічної бази регулювання відносин у цій сфері, що зумовлює недостатнє використання міжнародного досвіду. Водночас питання врахування відмінностей українського та міжнародного законодавства можна вирішити згідно зі статтею 9 Конституції України, де зазначено, що чинні міжнародні договори, згода на обов'язковість яких надана Верховною Радою України, є частиною національного законодавства України [2]. Це дає змогу стверджувати, що законодавство України у сфері охорони праці відповідає міжнародним нормам [3; 4], але є певні недоліки

законодавчого регулювання цих питань, тож залишається актуальною необхідність розроблення нових підходів до управління охороною праці, орієнтованих на міжнародні стандарти. Методи управління, які давали змогу досягти прийнятних результатів в минулому, в умовах сьогодення виявляються недостатньо ефективними. Також в умовах сьогодення не завжди може використовуватись ефективно накопичений фахівцями та керівниками досвід вирішення різноманітних завдань управління охороною праці, зокрема управління професійним ризиком. Отже, перехід до ризикорієнтованого підходу до управління охороною праці зумовлює потребу в методах наукової підтримки управлінських рішень, що базуються на ідентифікації виробничих небезпек та оцінюванні професійних ризиків.

**Матеріали та методи досліджень.** Узагальнення результатів аналізу наукових публікацій дає змогу стверджувати, що об'єктами моніторингу в системі управління охорони праці можуть бути виробничий травматизм і професійна захворюваність [5; 6; 7]; стан умов праці та фактори виробничого середовища [8]; заходи з поліпшення умов і безпеки праці.

Перехід до управління охороною праці на основі професійних ризиків має відбуватись на основі насамперед даних про фактичні рівні виробничих факторів, отриманих в результаті моніторингу. Такий підхід спрямований на завчасне виявлення та оцінювання фактичних рівнів шкідливих факторів з подальшим формуванням заходів з попередження впливу цих факторів на працюючих [9; 10]. Реалізація такого підходу передбачає використання

методів моделювання для вдосконалення оцінки ризиків [11]. Доцільність спостереження змін факторів шляхом здійснення виробничого моніторингу зумовлена тим, що значення шкідливих факторів можуть істотно змінюватися навіть за незмінного технологічного процесу.

Традиційний підхід до визначення класу умов праці встановлюється за максимальними разовими концентраціями шкідливих речовин відповідно до [12]. У разі дослідження вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони клас умов праці встановлюється залежно від кратності перевищення фактичної концентрації шкідливих речовин над гранично допустимою концентрацією (ГДК). Фрагмент відповідної таблиці [12] подано у табл. 1.

Для дослідження використано дані про рівні запиленості на робочому місці колія плит та блоків кар'єру з видобутку граніту, отримані в процесі виробничого моніторингу. Шкідливий фактор – пил, для якого встановлено ГДК 2 мг/

м<sup>3</sup>. Результати вимірів концентрації пилу для різних технологічних процесів, проведені протягом першої години з початку роботи, подано на рис. 1.

Техпроцес 1 – це фактично традиційна технологія виконання робіт, що характеризується постійно працюючою витяжною вентиляцією (призначена для видалення з приміщення цеху забрудненого повітря) з мінімальною продуктивністю, включення відбувається на 20-й хвилині від початку процесу.

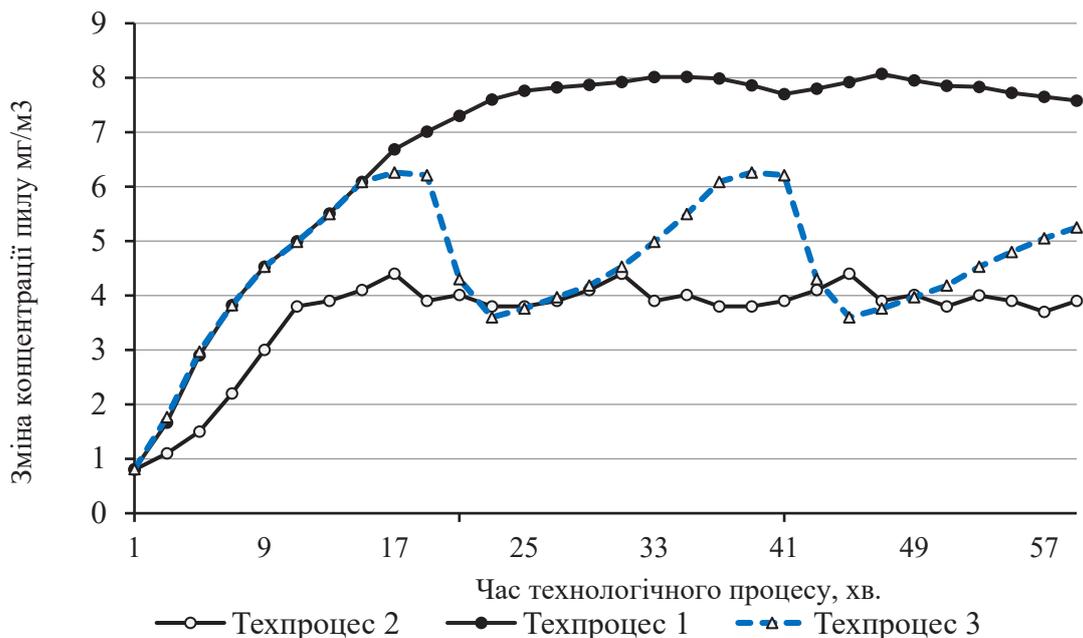
Техпроцес 2 характеризується працюючою на середню потужність витяжною вентиляцією, включення відбувається автоматично в разі перевищення заздалегідь виставленого граничного значення концентрації пилу у 4 мг/м<sup>3</sup>.

Техпроцес 3 характеризується працюючою на максимальну потужність витяжною вентиляцією, включення відбувається автоматично в разі перевищення заздалегідь виставленого граничного значення концентрації пилу

Таблиця 1

**Класи умов праці залежно від вмісту в повітрі робочої зони шкідливих речовин**

| Групи шкідливих речовин   | Класи умов праці |           |         |          |           | небезпечний<br>4 |
|---|------------------|-----------|---------|----------|-----------|------------------|
|   | допустимий<br>2  | шкідливий |         |          | 3.4       |                  |
|   | 3.1              | 3.2       | 3.3     |          |           |                  |
| Шкідливі речовини переважно загальнотоксичної дії 1, 2 класів небезпечності | ≤ ГДК            | 1,1–3,0   | 3,1–6,0 | 6,1–10,0 | 10,1–20,0 | > 20,0           |



**Рис. 1. Динаміка зміни концентрації пилу для різних технологічних процесів (працівник – колій плит та блоків)**

Таблиця 2

## Оцінка різних варіантів технологічного процесу з урахуванням концентрації пилу

| Варіант техпроцесу | Середнє значення концентрації пилу за годинний цикл (мг/м <sup>3</sup> ) | Умовні витрати на варіант техпроцесу (порівняно з 1) | Показник ефективності фінансування заходів з охорони праці |
|--------------------|--|--|--|
| Техпроцес 1        | 6,62   | 1  | 0,1511   |
| Техпроцес 2        | 3,59   | 1,55   | 0,1688   |
| Техпроцес 3        | 4,52   | 1,27   | 0,1689   |

у 6 мг/м<sup>3</sup>, а виключення – коли значення концентрації пилу досягає 4 мг/м<sup>3</sup>.

**Результати.** За результатами проведених вимірів концентрації пилу отримано фактичні дані, на основі яких у подальшому проведено розрахунки щодо обґрунтування витрат на заходи з поліпшення умов праці, зокрема, в межах цього дослідження, – на зменшення концентрації пилу в повітрі робочої зони.

Результати дослідження дають змогу обґрунтувати обсяги фінансування, які необхідно виділити для нормалізації умов праці, з урахуванням обмежень, які накладаються на загальні обсяги коштів, а також того рівня концентрації пилу, якого необхідно досягти. Для цього пропонується використовувати показник ефективності фінансування заходів з охорони праці, який може бути розрахований за формулою:

$$E_i = \frac{1}{C_i \times Z_i}, \quad (1)$$

де  $E_i$  – показник ефективності фінансування заходів з охорони праці;  $C_i$  – рівень показника (в цьому прикладі – концентрація пилу), який може бути досягнуто за вжиття  $i$ -го заходу,  $Z_i$  – обсяг фінансування  $i$ -го варіанта заходу.

Враховуючи фізичний зміст показника (1), можемо стверджувати, що кращим буде захід, для якого отримано максимальне значення цього показника. В цьому дослідженні вибір заходу передбачає вибір одного з варіантів ведення технологічного процесу. Результати вимірів та розрахунків зведено в табл. 2.

З використанням отриманих результатів (табл. 2) можна стверджувати:

– відповідно до розрахованого показника, ефективність фінансування Техпроцесу 2 та Техпроцесу 3 може вважатися приблизно рівною;

– якщо наявні кошти в достатньому обсязі, треба вибрати Техпроцес 2, оскільки саме він забезпечує мінімальний рівень концентрації пилу.

Отже, найбільш ефективним є захід, який дає змогу максимально знизити рівень виробничого фактору порівняно з іншими заходами за однакових обсягів фінансування.

**Висновки.** Для удосконалення управління охороною праці на підприємствах в умовах переходу до застосування ризикоорієнтованого підходу пропонується проводити дослідження умов праці з використанням системи виробничого моніторингу. Використання отриманих даних дає змогу провести розрахунки, що дають можливість обґрунтувати вибір найбільш дієвих заходів, спрямованих на поліпшення умов праці з урахуванням обсягів фінансових коштів, необхідних для їх реалізації.

Як перспективний напрям розвитку цього підходу може бути запропоновано використання методів математичного моделювання, експертних оцінок та теорії прийняття рішень. Застосування запропонованого підходу сприятиме стимулюванню роботодавців до створення й підтримки безпечних та нешкідливих умов праці.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Про охорону праці: Закон України від 14 жовтня 1992 р. № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>.
2. Конституція України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр#Text>.
3. Конвенція про дискримінацію в галузі праці та занять № 111. Редакція від 24 червня 1975 р. URL: [http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993\\_161](http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_161).
4. Конвенція про професійну орієнтацію та професійну підготовку в галузі розвитку людських ресурсів № 142. Редакція від 23 червня 1975 р. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993\\_057#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_057#Text).
5. Мезенцева І., Кузьменко О., Труш О., Вамболь С. Аналіз причин виробничого травматизму та шляхів його зниження в сучасних реаліях. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2023. № 39 (3–4). С. 8–14.
6. Stemn E. Analysis of Injuries in the Ghanaian Mining Industry and Priority Areas for Research, Safety and Health at Work 10/2. 2019. P. 151–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2018.09.001>.

7. Mekhathil A., El-Menyar H. Occupational injuries in workers from different ethnicities. *International Journal of Critical Illness and Injury Science*. 2016. № 6/1. P. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.4103/2229-5151.177365>.
8. Kruzhilko O., Polukarov O., Vambol S., Vambol V., Khan N., Maystrenko V., Kalinchuk V., Khan A. Control of the workplace environment by physical factors and SMART monitoring. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2020. № 1 (103). P. 18–29. DOI: 10.5604/01.3001.0014.1770.
9. Таїрова Т., Романенко Н., Сліпачук О. Підвищення результативності заходів із запобігання виробничому травматизму на основі моделювання системи охорони праці в машинобудуванні. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2020. № 36 (4). С. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.36804/nndipbop.36-4.2020.23-29>.
10. Голінько В., Чеберячко Ю., Дерюгін О., Архирей М. Удосконалення процедури оцінки професійного ризику на промисловому підприємстві. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2022. № 38 (1–2). С. 3–14.
11. Ткалич І. 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.
12. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»: Наказ МОЗ України від 8 квітня 2014 року № 248. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text>.

#### REFERENCES:

1. Verkhovna Rada of Ukraine (1992). Pro okhoronu pratsi: Zakon Ukrainy vid 14.10.1992 r. № 2694-XII [On labor protection: Law of Ukraine dated 14.10.1992 No. 2694-XII]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>. [in Ukrainian]
2. Verkhovna Rada of Ukraine (1996). Konstytutsiia Ukrainy [Constitution of Ukraine]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр#Text>. [in Ukrainian]
3. Verkhovna Rada of Ukraine (1975). Konventsiiia pro dyskryminatsiiu v haluzi pratsi ta zaniat № 111 [Convention on Discrimination in the Field of Work and Occupation No. 111]. Edition of June 24, 1975. Retrieved from: [http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993\\_161](http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_161). [in Ukrainian]
4. Verkhovna Rada of Ukraine (1975). Konventsiiia pro profesiinu oriientsatsiiu ta profesiinu pidhotovku v haluzi rozvytku liudskykh resursiv № 142 [Convention on Professional Orientation and Professional Training in the Field of Human Resources Development No. 142]. Edition of June 23, 1975. Retrieved from: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993\\_057#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_057#Text). [in Ukrainian]
5. Mezentseva I., Kuzmenko O., Trush O., Vambol S. (2023). Analiz prychny vyrobnychoho travmatyzmu ta shliakhiv yoho znyzhennia v suchasnykh realiakh [Analysis of the causes of industrial injuries and ways to reduce them in modern realities]. *Problems of labor protection in Ukraine*, 39 (3–4), 8–14. [in Ukrainian]
6. E. Stern (2019). Analysis of Injuries in the Ghanaian Mining Industry and Priority Areas for Research, Safety and Health at Work 10/2, pp. 151–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2018.09.001>.
7. Mekhathil, A. El-Menyar, H. (2016). Occupational injuries in workers from different ethnicities, *International Journal of Critical Illness and Injury Science* 6/1, pp. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.4103/2229-5151.177365>.
8. O. Kruzhilko, O. Polukarov, S. Vambol, V. Vambol, N. Khan, V. Maystrenko, V. Kalinchuk, A. Khan (2020). Control of the workplace environment by physical factors and SMART monitoring. *Archives of Materials Science and Engineering* 2020; 1 (103): 18–29. DOI: 10.5604/01.3001.0014.1770.
9. Tairova T., Romanenko N., Slipachuk O. (2020). Pidvyshchennia rezultatyvnosti zakhodiv iz zapobihannia vyrobnychomu travmatyzmu na osnovi modeliuvannia systemy okhorony pratsi v mashynobuduvanni [Increasing the effectiveness of measures to prevent industrial injuries based on the modeling of the occupational health and safety system in mechanical engineering]. *Problems of labor protection in Ukraine*, 36 (4), 23–29. Retrieved from: <https://doi.org/10.36804/nndipbop.36-4.2020.23-29>. [in Ukrainian]
10. V. Golinko, Yu. Cheberyachko, O. Deryugin, and M. Arkhirey (2022). Udokonalennia protsedury otsinky profesiinoho ryzyku na promyslovomu pidpriemstvi [Improvement of the occupational risk assessment procedure at an industrial enterprise]. *Problems of labor protection in Ukraine*, 38 (1–2), 3–14. [in Ukrainian]
11. Tkalych I. (2019). Teoretychni osnovy pobudovy metodyky otsinky profesiinoho ryzyku, pryiniatnoi dlia pidpriemstv riznykh vydiv ekonomichnoi diialnosti [Theoretical foundations of the construction of the professional risk assessment methodology, acceptable for enterprises of various types of economic activity]. *Bulletin of Kremenchug National University named after Mykhailo Ostrogradsky*. No. 3 (116), pp. 113–119. [in Ukrainian]

12. Verkhovna Rada of Ukraine (2014). Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl "Hihienichna klasyfikatsiia pratsi za pokaznykamy shkidlyvosti ta nebezpechnosti faktoriv vyrobnychoho seredovyshcha, vazhkosti ta napruzhenosti trudovoho protsesu": nakaz MOZ Ukrainy vid 08.04.2014 № 248 [On the approval of the State sanitary norms and rules "Hygienic classification of work according to indicators of harmfulness and dangerous factors of the production environment, difficulty and tension of the labor process": order of the Ministry of Health of Ukraine dated 04/08/2014 No. 248]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text>. [in Ukrainian]

УДК 331.45

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-16>

## РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ДЛЯ РОБІТ НА ВИСОТІ

**Кружилко Олег Євгенович,**

доктор технічних наук,  
професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0001-8624-1515

**Чеберячко Юрій Іванович,**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0001-7307-1553

**Гусаков Володимир Володимирович,**

студент групи 263-23-2М  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0009-0002-2501-599X

*У статті наведено перелік можливих заходів безпеки, які використовуються під час виконання робіт на висоті. Також у роботі виконано розрахунок витрат на заходи безпеки для робіт на висоті п'ять метрів із заміни м'якої покрівлі будівлі. Виконано класифікацію заходів безпеки. Під час розрахунку враховано всі можливі витрати, в тому числі на матеріали, роботу персоналу, послуги. Витрати відображені як абсолютно (загальні), так і в перерахунку на рік з урахуванням строків служби матеріалів, періодичності необхідних послуг. Розглянуто вартість одного з можливих основних заходів безпеки для захисту від падіння: стаціонарне огороження, знімне огороження, запобіжні пояси зі страхувальним тросом. Виконано порівняння заходів безпеки з точки зору витрат на їх впровадження.*

**Ключові слова:** робота на висоті, вартість, витрати, заходи безпеки.

### ***Kruzhilko Oleg, Cheberyachko Yuriy, Gusakov Volodymyr. Calculation of costs of safety measures for work at height***

*This article provides a list of possible safety measures used when working at height. Also, in this work, the costs of safety measures for work at a height of five meters to replace the soft roof of a building are calculated. A classification of safety measures has been made. The calculation takes into account all possible costs, including materials, personnel, services, etc. The costs are reflected both in absolute terms (total) and per year, taking into account the service life of materials and the frequency of the required services. The cost of one of the possible basic safety measures to protect against falls is considered: a stationary guardrail, a removable guardrail, safety belts with a safety cable. A comparison of safety measures in terms of the cost of their implementation is made.*

**Key words:** work at height, cost, expenses, safety measures.

**Вступ.** Вимоги законодавчих та нормативно-правових актів з охорони праці передбачають значну кількість обов'язкових заходів безпеки, і кожен з них вимагає різного рівня витрат.

Фінансування охорони праці здійснюється роботодавцем [1, с. 19]. Витрати є загальною сумою усіх витрат у грошовій формі [2, с. 113]. Під час визначення витрат необхідно врахувати витрати на матеріали, їх строк служби, витрати на послуги (навчання, медичні огляди тощо) та їх періодичність, а також витрати на роботу персоналу.

Згідно з даними Німецької ради підприємців, втрати від нещасних випадків на 10 разів

перевищують витрати на їх запобігання [3]. Ці нещасні випадки на підприємствах можуть призвести до смерті працівників, на навчання яких держава витрачає значні кошти. Заходи з охорони праці мають велике економічне значення, оскільки вони не лише зберігають життя та здоров'я працівників, але й допомагають підвищити продуктивність праці та зменшити витрати на лікування, компенсації за важкі та шкідливі умови праці.

Теоретичні та практичні аспекти оцінки витрат на охорону праці досліджувалися у наукових дослідженнях Л.В. Гуцаленко, С.Ф. Голова, М.С. Пушкаря, П.В. Іванюти,

С.В. Свірко, Я.П. Іщенко, В.О. Ластовецького, Л.В. Нападівської, Л.К. Сук та інших вчених.

Більшість досліджень оцінюється згідно з П(С)БО 16 «Витрати» [4], де основним критерієм класифікації витрат є їх віднесення до кінцевого продукту виробництва. Тобто непрямі витрати розраховують витрати, які стосуються виробництва кількох видів продукції та враховуються у собівартості продукції за допомогою спеціальних методів розподілу.

Питання щодо заходів з охорони праці є актуальним, що підтверджується увагою, яку приділяють їм дослідники. Аналіз літературних джерел показує, що одна частина науковців зосереджується на питаннях відображення витрат на заходи з охорони праці в бухгалтерському обліку підприємств. Наприклад, О.І. Коблянська [5] висвітлює необхідність обліку компенсаційних виплат працівникам за придбання ними спецодягу та інших засобів індивідуального захисту, особливо якщо нормативні строки видачі цих засобів порушено.

Іноді необхідно вибирати між декількома заходами безпеки, і в такому разі розмір витрат може стати ключовим критерієм вибору. Аналіз наукових публікацій показав, що загальним питанням фінансування заходів з охорони праці приділяється значна увага [6; 7; 8]. Відзначено, що безпека виробничого процесу визначається залежно від обсягів фінансових резервів підприємств для покриття можливих збитків внаслідок несприятливих подій, у тому числі аварій. Моделювання фінансової стійкості підприємства може розглядатися з урахуванням забезпечення належного рівня безпеки виробничих процесів та обладнання [6]. Відсутність в Україні єдиної державної системи статистичної звітності стосовно нещасних випадків на виробництві, аварій та професійних захворювань, шкідливих умов праці, випадків погіршення здоров'я, пов'язаних з професійною діяльністю, унеможлиблює проведення аналізу витрат і вигід у процесі забезпечення належного

рівня безпеки та гігієни праці [7]. Методи оцінки та управління ризиками значною мірою становлять основу управління безпекою праці, але більшість досліджень у цій галузі базується на моделях та процедурах, які недостатньо враховують витрати на заходи безпеки [7]. Отже, розрахунок витрат на заходи безпеки та вибір конкретних заходів безпеки, їх обґрунтування на основі величини витрат, в тому числі під час виконання робіт на висоті, не проводились.

**Матеріали та методи.** Для прикладу проведено розрахунок витрат на заходи безпеки під час виконання робіт на висоті із заміни м'якої покрівлі п'ятиповерхової будівлі площею 312 м<sup>2</sup> (24 м на 13 м) бригадою у складі п'яти монтажників.

Під час виконання розрахунку витрат враховано, що може використовуватися огорожа двох типів, а саме стаціонарна чи леєрна знімна. Додатково проведено розрахунок витрат на відпрацювання навичок дії у надзвичайних ситуаціях.

Витрати відображені загалом та на один рік, оскільки строк служби матеріалів та періодичність послуг можуть бути різними. Робота передбачає використання змінної леєрної огорожі як натягнутого у дві полоси металевого тросу [4].

**Результати.** Дані, необхідні для проведення розрахунків, містяться у табл. 1–14.

- 1) Розрахунок витрат на стаціонарне огородження (табл. 1, 2).
- 2) Розрахунок витрат на леєрну знімну огорожу (табл. 3, 4).
- 3) Розрахунок витрат на використання запобіжних поясів з страхувальним тросом (табл. 5, 6).
- 4) Розрахунок витрат на засоби індивідуального захисту (табл. 7).
- 5) Розрахунок витрат на послуги відповідності персоналу (табл. 8).
- 6) Розрахунок витрат на роботу персоналу для проведення інструктажів з охорони праці (періодичний, позаплановий та цільовий) (табл. 9).

Таблиця 1

**Розрахунок витрат на матеріали**

| Найменування                 | Кількість | Вартість одиниці | Загальна вартість | Строк служби, років | Вартість на рік, грн |
|------------------------------|-----------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Куточок сталевий 50 x 50 x 5 | 0,64      | 32 000           | 20 480            | 6                   | 3 413                |
| Полоса сталева 50 x 4        | 0,12      | 37 000           | 4 329             | 6                   | 722                  |
| Ґрунт                        | 5         | 67,5             | 337,5             | 6                   | 56                   |
| Емаль                        | 7,5       | 78,9             | 591,8             | 6                   | 99                   |
| Електроди для зварювання     | 5         | 40               | 200               | 6                   | 33                   |

Загальні витрати становлять 25 938 грн.

Загальні витрати на рік становлять 4 323 грн.

Таблиця 2

**Розрахунок витрат на роботу персоналу**

| Кваліфікація – вид робіт      | Необхідна кількість персоналу, ос. | Вартість одиниці персоналу на годину, грн | Необхідна кількість годин | Загальна вартість, грн | Витрати на рік на роботу персоналу, грн |
|-------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------|------------------------|---|
| Зварник – монтаж огороження   | 2                                  | 140                                       | 32                        | 8 960                  | 1 493                                   |
| Монтажник – монтаж огороження | 2                                  | 130                                       | 32                        | 8 320                  | 1 387                                   |

Загальні витрати становлять 17 280 грн.

Загальні витрати на рік становлять 2 880 грн.

Загальні витрати на матеріали та монтажні роботи на рік для стаціонарного огороження становлять 7 203 грн.

Таблиця 3

**Розрахунок витрат на матеріали**

| Найменування                               | Кількість | Вартість одиниці | Загальна вартість | Строк служби, років | Вартість на рік, грн |
|--|-----------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Куточок сталевий 50 x 50 x 5               | 0,04      | 32 000           | 1 280             | 6                   | 213                  |
| Трос сталевий, 12 мм                       | 160       | 72               | 11 520            | 7                   | 1 646                |
| Затискач для троса                         | 24        | 21               | 504               | 7                   | 72                   |
| Талреп стяжка, 16 мм (Гак-кільце) діп 1480 | 8         | 170              | 1 360             | 7                   | 194                  |
| Анкер клиновий 16 x 200                    | 24        | 41               | 984               | 0,25                | 3 936                |
| Ґрунт                                      | 0,8       | 67,5             | 54                | 6                   | 9                    |
| Емаль                                      | 1,2       | 78,9             | 94,68             | 6                   | 15,78                |

Загальні витрати становлять 15 797 грн.

Загальні витрати на рік становлять 6 086 грн.

Таблиця 4

**Розрахунок витрат на роботу персоналу**

| Кваліфікація – вид робіт                     | Необхідна кількість персоналу, шт. | Вартість одиниці персоналу на годину, грн | Необхідна кількість годин | Загальна вартість, грн | Витрати на рік на роботу персоналу, грн |
|--|------------------------------------|---|---------------------------|------------------------|---|
| Монтажник – монтаж леєрної знімної огорожі   | 3                                  | 130                                       | 32                        | 12 480                 | 12 480                                  |
| Монтажник – демонтаж леєрної знімної огорожі | 3                                  | 130                                       | 16                        | 6 240                  | 6 240                                   |

Загальні витрати на рік становлять 18 720 грн.

Загальні витрати на матеріали та монтажні роботи на рік для на леєрної знімної огорожі становлять 24 806 грн.

Таблиця 5

**Розрахунок витрат на товарно-матеріальні цінності**

| Найменування                               | Кількість | Вартість одиниці | Загальна вартість | Строк служби, років | Вартість на рік, грн |
|--|-----------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Запобіжний пояс лямковий                   | 5         | 1 500            | 7 500             | 1,5                 | 5 000                |
| Строп страхувальний стрічковий з карабіном | 10        | 845              | 8 450             | 4                   | 2113                 |
| Трос сталевий, 12 мм                       | 80        | 72               | 5 760             | 7                   | 823                  |
| Затискач для троса                         | 24        | 21               | 504               | 7                   | 72                   |
| Анкер з кільцем 16 x 200                   | 6         | 75               | 450               | 0,25                | 1 800                |
| Талреп стяжка 16 мм (Гак-кільце) діп 1480  | 4         | 170              | 680               | 7                   | 97                   |

Загальні витрати становлять 23 344 грн.

Загальні витрати на рік становлять 9 905 грн.

Таблиця 6

**Розрахунок витрат на послуги та роботу персоналу**

| Кваліфікація – вид робіт/послуг                  | Необхідна кількість персоналу/ послуг, шт. | Вартість одиниці персоналу на годину, грн | Необхідна кількість годин | Загальна вартість, грн | Витрати на рік на роботу персоналу, грн |
|--|--|---|---------------------------|------------------------|---|
| Випробування запобіжних поясів та стропів до них | 10   | 400                                       | –                         | 4 000                  | 4 000                                   |
| Монтажник – монтаж троса                         | 3  | 140                                       | 16                        | 6 720                  | 6 720                                   |
| Монтажник – демонтаж троса                       | 2  | 140                                       | 16                        | 4 480                  | 4 480                                   |

Загальні витрати на рік становлять 15 200 грн.

Загальні витрати на матеріали, послуги та роботу персоналу на рік за використання запобіжних поясів зі страхувальним тросом становлять 25 105 грн.

Таблиця 7

**Розрахунок витрат на засоби індивідуального захисту**

| Найменування | Кількість | Вартість одиниці | Загальна вартість | Строк служби, років | Вартість на рік, грн |
|--------------|-----------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Каска        | 5         | 1 020            | 5 100             | 4                   | 1 275                |
| Черевики     | 5         | 850              | 4 250             | 0,5                 | 8 500                |
| Костюм       | 5         | 800              | 4 000             | 0,5                 | 8 000                |
| Рукавички    | 5         | 20               | 100               | 0,03846             | 2 600                |

Загальні витрати становлять 13 450 грн.

Загальні витрати на рік становлять 20 375 грн.

Таблиця 8

**Розрахунок витрат на послуги відповідності персоналу**

| Найменування                         | Кількість | Вартість одиниці | Загальна вартість | Строк служби, років | Вартість на рік, грн |
|--------------------------------------|-----------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Навчання                             | 5         | 560              | 2 800             | 1                   | 2 800                |
| Медичний огляд                       | 5         | 480              | 2 400             | 1                   | 2 400                |
| Психофізіологічна експертиза         | 5         | 300              | 1 500             | 3                   | 500                  |
| Психіатричний та наркологічний огляд | 5         | 800              | 4 000             | 2                   | 2 000                |
| Навчання за професією                | 5         | 1 600            | 8 000             | 1                   | 8 000                |

Загальні витрати становлять 18 700 грн.

Загальні витрати на рік становлять 15 700 грн.

Таблиця 9

**Розрахунок витрат на роботу персоналу**

| Кваліфікація – вид робіт   | Необхідна кількість персоналу, шт. | Вартість одиниці персоналу на годину, грн | Необхідна кількість годин | Загальна вартість, грн | Витрати на рік на роботу персоналу, грн |
|--|------------------------------------|---|---------------------------|------------------------|---|
| Інженер з охорони праці – розробка та перегляд інструкції з охорони праці      | 1                                  | 138                                       | 24                        | 3 312                  | 3 312                                   |
| Майстер – проведення періодичного, позапланового та цільового інструктажу з ОП | 1                                  | 150                                       | 13                        | 1 950                  | 1 950                                   |

Загальні витрати на рік становлять 5 262 грн.

7) Розрахунок витрат на використання організаційно-розпорядчої документації (табл. 10).

8) Розрахунок витрат на персонал для періодичного контролю над безпечним проведенням робіт (табл. 11).

9) Розрахунок витрат на інформаційні знаки та таблички (табл. 12).

10) Розрахунок витрат на послуги відпрацювання навичок дії в надзвичайних ситуаціях (табл. 13).

Таблиця 10

**Розрахунок витрат на роботу персоналу**

| Кваліфікація – вид робіт  | Необхідна кількість персоналу, шт. | Вартість одиниці персоналу на годину, грн | Необхідна кількість годин | Загальна вартість, грн | Витрати на рік на роботу персоналу, грн |
|---|------------------------------------|---|---------------------------|------------------------|---|
| Начальник ділянки – оформлення наряду допуску                     | 1                                  | 160                                       | 8                         | 1 280                  | 1 280                                   |
| Майстер – допуск до роботи та перевірка виконання заходів безпеки | 1                                  | 150                                       | 130                       | 19 500                 | 19 500                                  |
| Проектант – розробка та погодження ПВР. 4 ПВР на рік              | 1                                  | 140                                       | 96                        | 13 440                 | 13 440                                  |

Загальні витрати на рік становлять 34 220 грн.

Таблиця 11

**Розрахунок витрат на персонал**

| Кваліфікація – вид робіт  | Необхідна кількість персоналу, шт. | Вартість одиниці персоналу на годину, грн | Необхідна кількість годин | Загальна вартість, грн | Витрати на рік на роботу персоналу, грн |
|---|------------------------------------|---|---------------------------|------------------------|---|
| Інженер з охорони праці – контроль безпечного виконання робіт протягом 5 годин на тиждень | 1                                  | 138                                       | 260                       | 35 880                 | 35 880                                  |

Таблиця 12

**Розрахунок витрат на інформаційні знаки та таблички**

| Найменування      | Кількість | Вартість одиниці | Загальна вартість | Строк служби, років | Вартість на рік, грн |
|-------------------|-----------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Знаки та таблички | 22        | 55               | 1 210             | 4                   | 303                  |

Таблиця 13

**Розрахунок витрат на послуги відпрацювання навичок дії в надзвичайних ситуаціях**

| Найменування                                      | Кількість | Вартість одиниці | Загальна вартість | Строк служби, років | Вартість на рік, грн |
|---|-----------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Періодичне навчання з надання домедичної допомоги | 5         | 1 500            | 7 500             | 1                   | 7 500                |

В табл. 14 наведено узагальнені результати розрахунків витрат на заходи безпеки для робіт на висоті по заміні м'якої покрівлі п'ятиповерхової будівлі.

Порівняння вартості технічних та організаційних заходів безпеки.

Технічні заходи. Вартість стаціонарної огорожі становить 7,2 тис. грн/рік, леєрної знімної огорожі – 24,8 тис. грн/рік.

Організаційні заходи. Вартість усіх організаційних заходів безпеки становить 144 тис. грн/рік. Вартість, наприклад, періодичного контролю над безпечним проведенням робіт (п'ять годин на тиждень) – 35,9 тис. грн/рік, використання наряд-допусків – 20,8 тис. грн/рік, відпрацювання навичок дії в надзвичайних ситуаціях – 7,5 тис. грн/рік.

Порівняння вартості технічних та організаційних заходів показує, що найефективнішим вкладенням є огороження перепаду по висоті, оскільки це технічний захід безпеки і його вартість незначна порівняно з організаційними заходами безпеки, які є менш ефективними з точки зору безпеки.

Під час виконання робіт на висоті зазвичай використовується один з двох заходів безпеки – огороження чи запобіжні пояси, і якщо порівняти їх вартість на рік, а саме стаціонарного огороження перепаду по висоті – 7,2 тис. грн/рік, леєрної знімної огорожі – 24,8 тис. грн/рік та використання запобіжних поясів зі страховальним тросом – 25,1 тис. грн/рік, то видно, що найвигіднішим є стаціонарне огороження перепаду по висоті, але його доцільно використовувати,

Таблиця 14

Узагальнені результати розрахунків витрат на заходи безпеки для робіт на висоті із заміни м'якої покрівлі п'яти поверхової будівлі

| Найменування  | Витрати на матеріали/послуги |                  |                   | Витрати на роботу власного персоналу/сторонні послуги |                      |  | Необхідна кількість персоналу, шт. | Вартість одиниці персоналу на годину, грн. | Необхідна кількість годин/годин на рік | Загальна вартість, грн. | Витрати на рік на роботу персоналу, грн. | Загальні витрати на захід безпеки, грн. |
|---|------------------------------|------------------|-------------------|---|----------------------|--|------------------------------------|--|--|-------------------------|--|---|
|   | Кількість                    | Вартість одиниці | Загальна вартість | Строк служби, років                                   | Вартість на рік, грн | Кваліфікація - вид робіт/послуг                  |                                    |  |  |                         |  |   |
| 1   | 2                            | 3                | 4                 | 5   | 6                    | 7  | 8                                  | 9  | 10                                     | 11                      | 12                                       | 13                                      |
| <b>Стаціонарне огородження перепяду по висоті</b>             |                              |                  |                   |   |                      |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Куточок сталевий 50 x 50 x 5                                  | 0,64                         | 32 000           | 20 480            | 6   | 3 413                | Зварник – монтаж огородження                     | 2                                  | 140  | 32                                     | 8960                    | 1493                                     | 7203                                    |
| Полоса сталева 50 x 4   | 0,12                         | 37 000           | 4 320             | 6   | 722                  | Монтажник – монтаж огородження                   | 2                                  | 130  | 32                                     | 8320                    | 1387                                     |   |
| Ґрунт   | 5                            | 67,5             | 337,5             | 6   | 56                   |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Емаль   | 7,5                          | 78,9             | 591,8             | 6   | 99                   |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Електроди для зварювання                                      | 5                            | 40               | 200               | 6   | 33                   |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| <b>Леєрна зміна огорожа</b>                                   |                              |                  |                   |   |                      |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Куточок сталевий 50 x 50 x 5                                  | 0,04                         | 32 000           | 1 280             | 6   | 213                  | Монтажник – монтаж леєрної знімної огорожі       | 3                                  | 130  | 32                                     | 12480                   | 12480                                    | 24806                                   |
| Трос сталевий, 12 мм  | 160                          | 72               | 11 520            | 7   | 1 646                |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Затискач для троса  | 24                           | 21               | 504               | 7   | 72                   |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Талреп стяжка 16 мм (ґак-кільце) діп 1480                     | 8                            | 170              | 1 360             | 7   | 194                  |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Анкер клиновий 16 x 200                                       | 24                           | 41               | 984               | 0,25  | 3936                 | Монтажник – демонтаж леєрної знімної огорожі     | 3                                  | 130  | 16                                     | 6240                    | 6240                                     |   |
| Ґрунт   | 0,8                          | 67,5             | 54                | 6   | 9                    |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Емаль   | 1,2                          | 78,9             | 94,68             | 6   | 15,78                |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| <b>Використання запобіжних поясів зі страхувальним тросом</b> |                              |                  |                   |   |                      |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Запобіжний пояс лямковий                                      | 5                            | 1 500            | 7 500             | 1,5   | 5 000                | Випробування запобіжних поясів та стропів до них | 10                                 | 400  | -                                      | 4000                    | 4000                                     | 25105                                   |
| Строп страхувальний стрічковий з карабіном                    | 10                           | 845              | 8 450             | 4   | 2 113                | Монтажник – монтаж троса                         | 3                                  | 140  | 16                                     | 6720                    | 6720                                     |   |
| Трос сталевий, 12 мм  | 80                           | 72               | 5 760             | 7   | 823                  |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Затискач для троса  | 24                           | 21               | 504               | 7   | 72                   |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Анкер з кільцем 16 x 200                                      | 6                            | 75               | 450               | 0,25  | 1 800                |  |                                    |  |  |                         |  |   |
| Талреп стяжка 16 мм (ґак-кільце) діп 1480                     | 4                            | 170              | 680               | 7   | 97                   | Монтажник – демонтаж троса                       | 2                                  | 140  | 16                                     | 4480                    | 4480                                     |   |

Закінчення табл. 14

| 1   | 2  | 3     | 4     | 5       | 6     | 7 | 8 | 9   | 10  | 11    | 12    | 13    |
|---|----|-------|-------|---------|-------|---|---|-----|-----|-------|-------|-------|
| <b>Засоби індивідуального захисту</b>   |    |       |       |         |       |   |   |     |     |       |       |       |
| Каска   | 5  | 1 020 | 5 100 | 4       | 1 275 |   |   |     |     |       |       |       |
| Черевки   | 5  | 850   | 4 250 | 0,5     | 8 500 |   |   |     |     |       |       |       |
| Костюм  | 5  | 800   | 4 000 | 0,5     | 8 000 |   |   |     |     |       |       |       |
| Рукавички   | 5  | 20    | 100   | 0,03846 | 2 600 |   |   |     |     |       |       |       |
| <b>Відповідність персоналу</b>  |    |       |       |         |       |   |   |     |     |       |       |       |
| Навчання  | 5  | 560   | 2 800 | 1       | 2 800 |   |   |     |     |       |       |       |
| Медичний огляд  | 5  | 480   | 2 400 | 1       | 2 400 |   |   |     |     |       |       |       |
| Психологічна експертиза   | 5  | 300   | 1 500 | 3       | 500   |   |   |     |     |       |       |       |
| Психіатричний та наркологічний огляд  | 5  | 800   | 4 000 | 2       | 2 000 |   |   |     |     |       |       |       |
| Навчання за професією   | 5  | 1 600 | 8 000 | 1       | 8 000 |   |   |     |     |       |       |       |
| <b>Інструментажі з охорони праці (періодичний, позаплановий та цільовий)</b>              |    |       |       |         |       |   |   |     |     |       |       |       |
| Інженер з охорони праці – розробка та перегляд інструкції з охорони праці                 |    |       |       |         |       |   | 1 | 138 | 24  | 3312  | 3312  |       |
| Майстер – проведення періодичного, позапланового та цільового інструктажу з охорони праці |    |       |       |         |       |   | 1 | 150 | 13  | 1950  | 1950  | 5262  |
| <b>Використання організаційно-розпорядчої документації</b>                                |    |       |       |         |       |   |   |     |     |       |       |       |
| Начальник дільниці – оформлення наряд-допуску   |    |       |       |         |       |   | 1 | 160 | 8   | 1280  | 1280  |       |
| Майстер – допуск до роботи та перевірка виконання заходів безпеки                         |    |       |       |         |       |   | 1 | 150 | 130 | 19500 | 19500 | 20780 |
| Проектант – розробка та погодження Проекту Виконання Робіт (ПВР). 4 ПВР на рік            |    |       |       |         |       |   | 1 | 140 | 96  | 13440 | 13440 | 13440 |
| <b>Періодичний контроль над безпечним проведенням робіт</b>                               |    |       |       |         |       |   |   |     |     |       |       |       |
| Інженер з охорони праці – контроль безпечного виконання робіт протягом 5 годин на тиждень |    |       |       |         |       |   | 1 | 138 | 260 | 35880 | 35880 | 35880 |
| <b>Інформаційні знаки та таблички</b>   |    |       |       |         |       |   |   |     |     |       |       |       |
| Знаки та таблички   | 22 | 55    | 1 210 | 4       | 303   |   |   |     |     |       |       |       |
| <b>Відпрацювання навичок дії в надзвичайних ситуаціях</b>                                 |    |       |       |         |       |   |   |     |     |       |       |       |
| Періодичне навчання з надання домедичної допомоги   | 5  | 1 500 | 7 500 | 1       | 7 500 |   |   |     |     |       |       |       |

якщо місце проведення робіт постійне. Якщо місце проведення робіт тимчасове, раціонально використовувати леєрну знімну огорожу, адже її вартість умовно така ж сама, як використання запобіжних поясів зі страхувальним тросом, але огороження є технічним заходом безпеки і ефективніше за засоби індивідуального захисту – запобіжні пояси.

Загалом вартість не є основним показником у питаннях безпеки. Коли інші показники мають однакові чи близькі (допустимі) значення, вартість відіграє ключову роль під час вибору чи прийняття рішення, як у наведених прикладах з леєрною знімною огорожею та запобіжними поясами або технічними та організаційними заходами.

Вартість є кількісним показником, і це дає можливість швидкого та зручного визначення цього показника за допомогою комп'ютерних програм, мобільних застосунків і отримання відповідних результатів для прийняття рішень.

**Висновки.** Загальна вартість використання усіх можливих заходів безпеки для робіт на висоті, що виконуються бригадою у складі 5 робітників, становить 123 тис. грн/рік за використання стаціонарної огорожі перепаду по висоті та 144 тис. грн/рік за використання запобіжних поясів зі страхувальними канатами чи леєрної знімної огорожі.

Найдорожчим заходом є організація заходів безпеки – контроль над безпечним проведення

робіт, що коштує 35,9 тис. грн/рік за тривалості контролю п'ять годин на тиждень.

Найдешевшим заходом безпеки є психофізіологічна експертиза, що коштує 0,5 тис. грн/рік.

Порівняння вартості технічних та організаційних заходів показує, що найефективнішим вкладенням є огороження перепаду по висоті, оскільки це технічний захід безпеки і його вартість незначна порівняно з організаційними заходами безпеки, які є менш ефективними з точки зору безпеки.

Порівняння вартості на рік використання стаціонарної/леєрної огорожі чи запобіжних поясів показує, що раціонально використовувати огорожі, адже вартість стаціонарної огорожі значно менша за вартість використання запобіжних поясів, а саме в 3,5 рази, а вартість леєрної знімної огорожі умовно така ж, як використання запобіжних поясів зі страхувальним тросом, але огороження є технічним заходом безпеки і ефективніше за засоби індивідуального захисту – запобіжні пояси.

Оскільки вартість є кількісним показником, перспектива її використання полягає у швидкому та зручному визначенні вартості за допомогою мобільних застосунків, комп'ютерних програм, що дасть змогу ухвалити відповідне рішення під час вибору заходів безпеки, визначення пріоритетних заходів та, як наслідок, раціонального використання ресурсів компанії, що відіграє значну роль, оскільки ресурси мають обмеження.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Про охорону праці: Закон України. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 1992. № 49. Ст. 668.
2. Словник фінансово-правових термінів / за заг. ред. Л.К. Воронової. 2-ге вид., переробл. і доповн. Київ: Алерта, 2011. 558 с.
3. Тацій І.В. Витрати на охорону праці як об'єкт управлінського обліку і аналізу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2020. № 2 (258). С. 87–92.
4. Положення бухгалтерського обліку 16 «Витрати»: Наказ Міністерства фінансів України від 31 грудня 1999 року № 318. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0027-00>.
5. Коблянська О.І., Бучма В.С. Актуальні аспекти обліку спецодягу та засобів індивідуального захисту. *Облік і фінанси АПК*. 2011. № 2. С. 28–31.
6. Polukarov O.I., Prakhovnik N.A., Polukarov Yu.O., Kruznilko O.Ye., Demchuk H.V. Stratification of expenses of insurance funds to cover risk situations of production process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetutu*. 2020. № 3. P. 137–144.
7. 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.
8. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*. 2016. № 253. P. 1–13.

#### REFERENCES:

1. Verkhovna Rada of Ukraine (1992). Zakon Ukrainy "Pro okhoronu pratsi" [Law of Ukraine "On Labor Protection"]. Information of the Verkhovna Rada of Ukraine. No. 49, Article 668. [in Ukrainian]

2. Voronova L.K. (red.) (2011). Slovnyk finansovo-pravovykh terminiv [Dictionary of financial and legal terms]. 2nd ed., revised. and additional K.: Alerta. 558 p. [in Ukrainian]
3. Tatsii I.V. (2020). Vytraty na okhoronu pratsi yak ob'ekt upravlinskoho obliku i analizu [Costs for labor protection as an object of management accounting and analysis]. *Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dal.* No. 2 (258). P. 87–92. [in Ukrainian]
4. Ministry of Finance of Ukraine (1999). Polozhennia bukhhalterskoho obliku 16 "Vytraty": Nakaz Ministerstva finansiv Ukrainy vid 31.12.99 r. № 318 [Accounting regulations 16 "Expenses": Order of the Ministry of Finance of Ukraine dated 31.12.99 No. 318]. Retrieved from: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0027-00>. [in Ukrainian]
5. Koblyanska O.I., Buchma V.S. (2011). Aktualni aspekty obliku spetsodiahu ta zasobiv individualnoho zakhystu [Current aspects of accounting for overalls and personal protective equipment]. *Accounting and finance of agriculture.* No. 2. P. 28–31. [in Ukrainian]
6. Polukarov O.I., Prakhovnik N.A., Polukarov Yu.O., Kruzhilko O.Ye., Demchuk H.V. (2020). Stratification of expenses of insurance funds to cover risk situations of production process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* 3. P. 137–144.
7. Tkalych I.M. (2019). Teoretychni osnovy pobudovy metodyky otsinky profesiinoho ryzyku, pryiniatnoi dlia pidpriemstv riznykh vydiv ekonomichnoi diialnosti [Theoretical foundations of the construction of the professional risk assessment methodology, acceptable for enterprises of various types of economic activity]. *Bulletin of Kremenchug National University named after Mykhailo Ostrogradsky.* No. 3 (116). P. 113–119. [in Ukrainian]
8. Aven T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research.* № 253. P. 1–13.

УДК 614.8.084

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-17>

## ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЗАХИСНОГО ОДЯГУ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГОМЕОСТАЗУ МЕТАЛУРГІВ

**Юсубова Лейла Яківна,**

магістр

Донецький національний технічний університет

**Костенко Віктор Климентович,**

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри безпеки праці і охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0001-8439-6564

*Аналіз сучасних інформаційних джерел дав змогу встановити, що робота у металургійній промисловості характеризується інтенсивними фізичними навантаженнями, недостатнім захистом від теплових факторів виробництва, які, діючи у сукупності, можуть призвести до перегріву та теплових травм.*

*Основними причинами порушення теплового балансу в організмах металургів можуть бути надмірний рівень прямого теплового випромінювання від обладнання, висока температура довкілля; тривале перебування у зоні впливу теплових факторів виробництва; підвищена внутрішня генерація тепла в організмі робітника внаслідок важкого фізичного навантаження; недостатня вентиляція та рух повітря; відсутність або неправильний вибір спецодягу. Розглянутий загальний підхід до оцінювання теплового балансу тіла людини вказав на безперечну актуальність питання забезпечення максимального видалення зовнішньої теплоти з поверхні захисного одягу.*

*Метою роботи було обґрунтування властивостей поверхневого шару захисного одягу для мінімізації негативного впливу на металургів виробничих зовнішніх теплових потоків.*

*Метод дослідження – теоретичний аналіз на основі класичних положень термодинаміки процесів тепломасопереносу на поверхні захисного одягу металургів.*

*Було поставлено такі завдання: обґрунтування раціональних параметрів відбиваючих промені поверхонь теплозахисного одягу металургів; розкриття умов ефективного виносу тепла з поверхні захисного одягу металургів.*

*Встановлено, що для створення безпечних та комфортних умов праці металургів необхідно забезпечити ефективні рівні відбиття променевого навантаження, максимальне власне випромінювання і конвекційний виніс теплоти з поверхні. Теоретично вибрано основні залежності, що розкривають механізм протидії тепловому навантаженню на металургів. Вперше теоретично обґрунтовано доцільність використання тканин з нерівномірною поверхневою текстурою для виготовлення захисного одягу людей що працюють в умовах нагрітого мікроклімату.*

**Ключові слова:** *тепловий баланс, гомеостаз, металургія, терморегуляція, одяг для захисту, вплив кольору, теплове навантаження, безпека праці, високотемпературні умови, метаболічне тепло, конвекція, радіація, випаровування.*

### **Yusubova Leila, Kostenko Viktor. The influence of the surface layer of protective clothing on ensuring the homeostasis of metallurgists**

*The analysis of modern information sources made it possible to establish that the work in the metallurgical industry is characterized by intense physical exertion, insufficient protection from thermal factors of production, which acting together can lead to overheating and thermal injuries.*

*The main reasons for the violation of the thermal balance in the bodies of metallurgists can be: an excessive level of direct thermal radiation from the equipment, high ambient temperature; prolonged stay in the zone of influence of thermal factors of production; increased internal heat generation in the worker's body due to heavy physical exertion; insufficient ventilation and air movement; lack or incorrect choice of work clothes. The considered general approach to the assessment of the thermal balance of the human body indicated the indisputable relevance of the issue of ensuring the maximum removal of external heat from the surface of protective clothing.*

*The purpose of the work was to substantiate the properties of the surface layer of protective clothing to minimize the negative impact on metallurgists of production external heat flows.*

*The research method is a theoretical analysis based on classical provisions of thermodynamics of heat and mass transfer processes on the surface of protective clothing of metallurgists.*

*Task: substantiation of rational parameters of reflective surfaces of heat-protective clothing of metallurgists; disclosure of the conditions for effective removal of heat from the surface of protective clothing of metallurgists.*

*It has been established that in order to ensure safe and comfortable working conditions for metallurgists, it is necessary to ensure: effective levels of radiation load reflection, maximum own radiation and convection removal of heat from the surface. Theoretically, the main dependences that reveal the mechanism of counteracting the heat load on metallurgists have been chosen. For the first time, the expediency of using fabrics with an uneven surface texture for the production of protective clothing for people working in a heated microclimate has been theoretically substantiated.*

**Key words:** *thermal balance, homeostasis, metallurgy, thermoregulation, protective clothing, effect of color, working conditions, physiological processes, thermal load, ergonomics, occupational safety, high temperature conditions, metabolic heat, convection, radiation, evaporation.*

**Вступ.** Тепловий баланс між доквіллям і тілами людей є критично важливою умовою підтримки їх працездатності та загального здоров'я. Він визначається як рівновага між кількістю тепла, що виробляється організмом, і тим, що втрачається або надходить з доквілля. Основні біофізичні процеси, що впливають на тепловий баланс, – це метаболізм, теплопровідність, конвекція, випромінювання та випаровування. Динаміка теплового балансу організму (гомеостаз) здійснюється через складну систему фізіологічних реакцій, які дають змогу адаптуватися до змін зовнішніх та внутрішніх умов. Гомеостаз підтримується безперервною роботою систем органів кровообігу, дихання, травлення, виділення тощо, постачанням у кров біологічно активних хімічних речовин, котрі забезпечують взаємодію клітин і органів.

Робота у металургійній промисловості характеризується інтенсивними фізичними навантаженнями, недостатнім захистом від теплових факторів виробництва, які, діючи у сукупності, можуть призвести до перегріву та теплових травм.

Основними причинами порушення теплового балансу в організмах металургів можуть бути:

- надмірний рівень прямого теплового випромінювання від обладнання;
- висока температура доквілля;
- тривале перебування у зоні впливу теплових факторів виробництва;
- підвищена внутрішня генерація тепла в організмі робітника внаслідок важкого фізичного навантаження;
- недостатні вентиляція та рух повітря;
- відсутність або неправильний вибір спецодягу.

Виходячи з технологічних, економічних та інших умов, неможливо одночасно привести до комфортного для існування людини рівня весь комплекс наведених негативних факторів металургійного виробництва.

Розуміння механізму теплового впливу на організм металурга є ключовим для розроблення ефективних заходів безпеки та забезпечення оптимальних умов праці. Для розкриття механізму використовують різноманітні

вимірювальні методи, які дають змогу оцінити тепловий стан організму та виявити потенційні ризики, пов'язані з робочим середовищем. Ці методи є ключовими для розроблення ефективних стратегій контролю стану організму та адаптації його до небезпечних теплових умов.

Для вимірювання теплового балансу використовують такі методи [1]:

- термометрія – вимірювання температури тіла та доквілля;
- калориметрія – визначення кількості тепла, що виробляється або поглинається організмом;
- гідрометрія – аналіз втрати рідини, в тому числі через потіння;
- моніторинг фізіологічних показників – вимірювання пульсу, артеріального тиску та інших показників, що можуть вказувати на перегрів.

Систематичне порушення теплового балансу у системі «організм металурга – доквілля», яке виникає через інтенсивну внутрішню генерацію тепла або недостатнє тепловідведення, веде до порушення гомеостазу – природної системи саморегуляції організму, яка підтримує теплову стабільність внутрішнього середовища. В результаті можуть виникати серйозні наслідки для здоров'я, зокрема тепловий удар та зневоднення, що здатні призвести до хронічних станів, таких як порушення серцево-судинної системи.

Проблемі визначення теплового тіла людини, яка перебуває у певному тепломасообміні з доквіллям, присвячено багато наукових робіт вітчизняних та зарубіжних дослідників [2–5]. В них надано низку результатів, у яких враховано складові загального теплового балансу. Аналіз сучасних методик визначення теплового балансу тіла людини виявив відсутність єдиного підходу та суттєві відмінності у підходах до визначення його складових. Наприклад, розбіжності у величинах конвекційного і променистого теплообміну, а також у коефіцієнтах опромінення варіюються від 5 до 90%, що справляє значний вплив на точність визначення радіаційної складової теплообміну [6]. Це може призвести до помилок

у розрахунках теплового комфорту та безпеки працівників у різних умовах.

Загальна формула теплового балансу тіла людини виглядає так [7–9]:

$$M = \pm \Delta Q - Q_p \pm Q_u \pm Q_r \pm Q_k - Q_{\phi}, \quad (1)$$

де  $M$  – теплота, яка виробляється організмом в результаті метаболічних процесів;  $Q_p$  – втрата власної теплоти тілом через випромінювання в інфрачервоному діапазоні хвиль;  $Q_k$  – втрата теплоти, яка виноситься з повітрям, що рухається навколо тіла;  $Q_u$  – тепловіддача через випаровування вологи з поверхні тіла;  $Q_{\phi}$  – теплота, що витрачається на фізіологічні процеси, такі як дихання та кровообіг;  $Q_r$  – променистий теплообмін із зовнішнім середовищем;  $\Delta Q$  – надлишок (накопичення) або нестача теплоти в організмі.

Формула теплового балансу тіла людини є фундаментальною для розуміння теплообміну та визначення необхідних умов для підтримки теплового комфорту та здоров'я людини під час роботи.

Вона дає змогу оцінити, як метаболічна теплота, компоненти теплообміну через шкіру та дихальні шляхи, а також механічна робота впливають на загальний тепловий стан організму.

Низка складових рівняння (1) має позитивний або негативний знак ( $\pm Q_u, \pm Q_r, \pm Q_k$ ), що означає надходження теплоти до організму людини або вилучення. Забезпечення захисту робітників від перегріву формально полягає в обмеженні складових, що мають позитивний показник.

Для розрахунку теплового балансу тіла людини на металургійному підприємстві необхідно врахувати основні зовнішні складові теплообміну: випромінювання з розігрітих частин обладнання; температуру, вологість та швидкість повітря в робочій зоні, оскільки вони визначають позитивний характер теплообміну між тілом та довкіллям.

Гомеостаз забезпечується комплексною роботою систем кровообігу, дихання, травлення, виділення тощо, тому одним з ефективних способів забезпечення їх надійної дії є застосування працівниками захисного одягу. Тканина такого одягу перебуває безпосередньо поряд із головними системами життєзабезпечення, вона служить свого роду панциром для захисту зазначених систем організму від інфрачервоного випромінювання та контакту з гарячим повітрям [10].

Головну роль у процесі теплозахисту відіграє поверхневий шар захисного одягу, адже основні види теплообміну, а саме відбиття

енергії, конвекційний її винос, реалізуються саме на поверхні. Вглиб одягу прямує тільки та теплота, що залишається після відбиття та зняття теплоти з поверхні. Тому питання забезпечення максимального видалення зовнішньої теплоти з поверхні захисного одягу металурга є **актуальним**.

**Метою** роботи є обґрунтування властивостей поверхневого шару захисного одягу для мінімізації негативного впливу на металургів виробничих зовнішніх теплових потоків.

**Метод дослідження** – теоретичний аналіз на основі класичних положень термодинаміки процесів тепломасопереносу на поверхні захисного одягу металургів.

#### **Завдання:**

– обґрунтування раціональних параметрів відбиваючих промені поверхонь теплозахисного одягу металургів;

– розкриття умов ефективного виносу тепла з поверхні захисного одягу металургів.

**Виклад основного матеріалу.** Поверхневий шар захисного одягу доцільно розглянути з позиції здатності відбивати теплове випромінювання. Колір поверхні відіграє важливу роль у відбитті та поглинанні тепла.

Мірою поглинання або відштовхування променів є коефіцієнт відбиття ( $\rho$ ) [11; 12]:

$$\rho = li/lr, \quad (2)$$

де  $lr, li$  – інтенсивність (густина) теплового потоку  $i$ , відповідно, відбитого та падаючого випромінювання,  $Вт/м^2$ .

Кількість відбитої поверхнею захисного одягу металурга променевої теплоти може бути визначена за формулою:

$$Q_r = F \cdot I \cdot \rho, \quad (3)$$

де  $F$  – площа опроміненої поверхні захисного одягу металурга,  $м^2$ ,  $I$  – інтенсивність (густина) теплового потоку,  $Вт/м^2$ ,  $\rho$  – коефіцієнт відбиття променів.

Відомо, що світлі кольори відбивають більше сонячного світла та тепла, тоді як темні поглинають їх (табл. 1).

Основний тепловий вплив здійснює інфрачервоне випромінювання (ІЧ) – частина електромагнітного спектру, яка лежить між видимим світлом та мікрохвильовим випромінюванням. Якщо припустити, що світлий колір відбиває 80% теплового випромінювання, а темний – лише 20%, одяг темного кольору збільшує теплове навантаження на працівника в чотири рази порівняно зі світлим.

Для зменшення нагрівання тіл людей зовнішнім поверхням захисних засобів надають

Таблиця 1

**Вплив кольору одягу на відбиття теплоти [13]**

| Колір спецодягу | Відбиття теплоти (%) | Поглинання теплоти (%) |
|-----------------|----------------------|------------------------|
| Білий           | Високе (~ 75–90%)    | Низьке                 |
| Жовтий          | Середнє (~ 60–75%)   | Середнє                |
| Червоний        | Низьке (~ 25–40%)    | Високе                 |
| Чорний          | Дуже низьке (< 25%)  | Дуже високе            |

посилений відбиваючий ефект, наносячи на них віддзеркалююче покриття. Багато речовин, прозорих у видимій області, виявляються непрозорими в деяких областях інфрачервоного випромінювання (ІЧ), і навпаки. Так, у більшості металів відбивна здатність для ІЧ значно більша, ніж для видимого світла, наприклад коефіцієнти відбиття Al, Au, Ag, Cu складають для ІЧ від 65 до 85%, можуть сягати 98%. Важливі кольори поверхонь. Так, пофарбовані у білий колір мають  $\rho = 0,7 \dots 0,8$ ; світло-сірий –  $0,4 \dots 0,5$ ; зелений –  $0,12 \dots 0,2$ . З цього випливає, що для поверхні протитеплого засобу доцільно вибрати білий колір або напилувати шар такого ж кольору металевого покриття. Показник  $\rho$  може також суттєво змінюватись залежно від кольору тканини, її текстури, величини шорсткості та інших чинників [12].

Інтенсивність опромінювання ( $I$ ,  $Вт/м^2$ ) залежить від площини поверхні, на яку спрямовано промені. Найбільша інтенсивність за вертикального напрямку, коли кут між вектором променю і поверхнею складає  $90^\circ$ . Відхилення того ж променя від вертикалі означає збільшення площині опромінювання і, відповідно, зменшення інтенсивності. Під час порівняння дії проміння  $I$  на два однакових за розмірами і показником  $\rho$  клаптів тканини, але з гладкою та хвилеподібною текстурами для першого з них інтенсивність опромінювання буде більшою. Це пояснюється тим, що у другому випадку випромінювання розсіюється на значно більшу загальну площу поверхні, тому інтенсивність опромінювання така:  $I_{r2} < I_{r1}$ . Отже, використовуючи рівняння (2), оцінимо інтенсивності відбиття:  $I_{i1} = \rho/I_{r1}$  та  $I_{i2} = \rho/I_{r2}$ , враховуючи що  $\rho = const$ , маємо  $I_{i1} < I_{i2}$ . Більшій відбиваючий ефект притаманний тканинам з нерівною поверхневою текстурою.

Для скорочення впливу теплового випромінювання використовуються різні матеріали та технології покриття. Це можуть бути спеціальні фарби та покриття, які відбивають ІЧ-промені. Також використовуються багаточарові матеріали, які комбінують відбивні та ізоляційні властивості для забезпечення ефективного захисту об'єктів від тепла і збільшення складової балансу –  $Q_n$  (див. 1). Для вибору матеріалів

або покриттів захисного одягу металургів їх поверхонь величину коефіцієнта  $\rho$  відбиття слід уточнювати експериментально.

Нагріта поверхня випромінює тепло у довкілля. Розрахунок ефективності випромінювання з поверхні захисного одягу можна виконати, використовуючи закон Стефана-Больцмана для випромінювання теплоти:

$$Q_p = F \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (4)$$

де  $Q_p$  – потужність випромінювання на одиницю площі,  $Вт/м^2$ ,  $F$  – площа нагрітої поверхні захисного одягу,  $м^2$ ,  $\varepsilon$  (емісійність) – коефіцієнт, який показує частку випромінювання тілом відносно випромінювання абсолютно чорного тіла (від 0 до 1, де 1 означає ідеальне чорне тіло),  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана,  $5,67 \cdot 10^{-8}$ ,  $Вт/(м^2 \cdot K^4)$ ,  $T$  – абсолютна температура тіла,  $К$ .

Величина  $\varepsilon$  може бути відома з довідникової літератури або встановлюється експериментально.

Нагріта до температури  $T_2$  поверхня засобу площиною  $F$  контактує з навколишнім повітрям нагріваючи його. Це збільшує конвекційні потоки, що приводить до виносу частини теплової енергії з поверхні. Можливі такі варіанти конвекції, як природня та вимушена. Як вимушена конвекція може використовуватись знімання теплоти потоком повітрям або рідини [13]. За вільного характеру конвекції на винос теплоти впливають переважно підйомна сила і сила в'язкості. Товщини теплового і гідродинамічного граничних шарів близькі за величиною.

Режим конвекційної тепловіддачі до повітря визначається величиною критеріїв Релея та Нуссельта [14]:

$$R_a = g \cdot l^3 \cdot \beta (T_2 - T_1) / (\nu \cdot a), \quad (5)$$

$$Nu = \alpha l / \lambda,$$

де  $g = 9,80665$  – стандартне прискорення вільного падіння,  $м/с^2$ ;  $l$  – визначальний лінійний розмір поверхні теплообміну,  $м$ ;  $\beta$ , – ізобарний коефіцієнт термічного розширення,  $К^{-1}$ ; (для повітря ця величина обернена до його абсолютної температури  $T$ , тобто  $\beta = 1/(t+273,15)$ );  $T_2$  і  $T_1$  – середні температури поверхні тканинного

майданчика і повітря (за межами рухомого шару),  $K$ ;  $\nu$  – кінематична в'язкість повітря,  $m^2/s$ ;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності повітря,  $m^2/s$ ;  $\alpha$  – середній коефіцієнт тепловіддачі,  $Wm/(m^2K)$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності повітря,  $Wm/(mK)$ .

Критеріальне рівняння для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі до повітря запропоновано [13] у вигляді  $Nu=C \cdot Ra \cdot n$ , де сталі  $C$  і  $n$  визначаються на основі експериментів. Умови теплообміну між рідиною (повітря) та поверхнею твердого тіла (тканина) характеризуються коефіцієнтом пропорційності, який називається коефіцієнтом тепловіддачі та визначає інтенсивність теплообміну. Значення коефіцієнта тепловіддачі дорівнює кількості теплоти, переданого в одиницю часу через одиницю поверхні за різниці температур між поверхнею і рідиною в 1,  $K$ . З літературних джерел відомо, що для вертикальних поверхонь у діапазоні температур ( $^{\circ}C$ ):

$-5 \leq \Delta t \leq 25$ , середній коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha \approx 6$ ,  $Wm/(m^2 \cdot K)$ .

Питомий тепловий конвекційний потік становить,  $Wm/m^2$ :

$$q_k = \alpha \cdot (T_2 - T_1),$$

відповідно, конвекційний потік з нагрітої до  $T_2$  поверхні розміром  $F$  також спрямований від тіла металурга:

$$-Q_k = F \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1), \text{ Wm.} \quad (6)$$

Аналіз виразу (6) показує, що збільшення конвекційної складової  $Q_k$  за перерозподілу зовнішнього теплового потоку можливе або

шляхом збільшення різниці температур, що недоцільно, або через збільшення площини майданчика, наприклад, за виконання її ребристою, не збільшуючи суттєво об'єм тканини. Міркування щодо площини поверхні за конвекційного виносу теплоти подібні тим, що належать до виразів (3 і 4). Регулярний моніторинг і адаптація захисного одягу до фізіологічних потреб людини значно знижують пов'язані з високотемпературним середовищем ризики [14; 15].

**Висновки.** Підтримання теплового балансу та гомеостазу є критично важливим для здоров'я та продуктивності працівників у металургійній промисловості. Поверхневий шар захисного одягу металурга є переднім рубежем, який відіграє значну роль у забезпеченні безпечних та комфортних умов його праці. Для цього необхідно забезпечити ефективні рівні відбиття променевого навантаження –  $Q_{\rho}$ , максимальне власне випромінювання –  $Q_p$  і конвекційний виніс теплоти з поверхні –  $Q_k$ .

У роботі теоретично вибрано основні залежності, що розкривають механізм протидії тепловому навантаженню на металургів. Це може стати науковим підґрунтям для подальшого обґрунтування практичних заходів щодо удосконалення індивідуальних засобів захисту від негативних теплових факторів металургійного виробництва.

Вперше теоретично обґрунтовано доцільність використання тканин з нерівномірною поверхневою текстурою для виготовлення захисного одягу людей, що працюють в умовах нагрітого мікроклімату.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. S.F. Neves, Campos J.B.L.M. The impact of water on firefighter protective clothing thermal performance and steam burn occurrence in firefighters. *Fire Safety Journal*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103506>.
2. Zhang H., Song G., Ren H., Cao J. The effects of moisture on the thermal protective performance of firefighter protective clothing under medium intensity radiant exposure. *Textile Research Journal*. 2018. № 88 (8). P. 847–862. DOI: 10.1177/0040517517690620.
3. Treatment of Firefighter's Suit against Fire to Increase Its Effectiveness / Eman Saad. DOI: <https://doi.org/10.12816/0045763>.
4. Kostenko V., Kostenko T., Zemlianskiy O., Maiboroda A., Kutsenko S. Automatization of individual anti-thermal protection of rescuers in the initial period of fire suppression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. No. 5/10 (89). P. 4–11.
5. Гаврилко О.А., Вашкевич Р.В. Наукові основи створення методів і засобів індивідуального проти-газотеплового захисту рятувальників: монографія. Львів: «Львівська політехніка», 2023. 387 с.
6. Ozgur Atalay, Senem Kursun Bahadir, Fatma Kalaoglu. An Analysis on the Moisture and Thermal Protective Performance of Firefighter Clothing Based on Different Layer Combinations and Effect of Washing on Heat Protection and Vapour Transfer Performance. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/540394>.
7. Aude Morel, Gauthier Bedek, Fabien Salaün & Daniel Dupont. A review of heat transfer phenomena and the impact of moisture on firefighters' clothing and protection. *Ergonomics*. 2014. № 57:7. P. 1078–1089. DOI: 10.1080/00140139.2014.907447.

8. Yun Su, Jun Li & Guowen Song. The effect of moisture content within multilayer protective clothing on protection from radiation and steam. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2017. № 24:2. P. 190–199. DOI: <https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1321890>.
9. Черичка А. Вогнестійкі тканини з мета-і пара-арамідних волокон. З чого шити сучасний костюм пожежника. 2019. URL: [teksika.ua/company/news/vognestiyki\\_tkanyny\\_z\\_metai\\_paraaramidnykh\\_volokon\\_z\\_chogo\\_shyty\\_suchasnyy\\_kostyum\\_pozhezhnyka](https://teksika.ua/company/news/vognestiyki_tkanyny_z_metai_paraaramidnykh_volokon_z_chogo_shyty_suchasnyy_kostyum_pozhezhnyka).
10. Abu Shaid, Lijing Wang, Rajiv Padhye, Martin Gregory. Low cost bench scale apparatus for measuring the thermal resistance of multilayered textile fabric against radiative and contact heat transfer. *Hardware X*. 2019. Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00060>.
11. "Safety of life activities. Workshop." (n.d.) Retrieved April 16, 2024. URL: [from files.khadi.kharkov.ua](https://files.khadi.kharkov.ua).
12. Henning A. The Heat reducing Effects of Reflective Clothing in Firefighting: A study on the efficiency of reflective textiles in personal protective equipment (Dissertation). 2022. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-92455>.
13. Костенко Т. Розвиток наукових основ підвищення безпеки рятувальників під час ведення оперативних дій в умовах нагрітого мікроклімату: автореф. дис. ... докт. техн. наук; ДВНЗ ДонНТУ. Покровськ, 2018. 40 с.
14. Materials of the XIII-th International Scientific and Practical. April 16, 2024. URL: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net).
15. Тепловіддача за вільним рухом повітря у великому об'ємі / Д. Сінат-Радченко, Н. Іващенко, С. Василенко. *Цукор України*. 2016. № 6–7 (126–127). С. 34–35.
16. Improving the protective properties of special clothing for the State Emergency Service workers for working in high-temperature conditions. Code "Protective clothing". Lviv 2017. P. 29
17. Santen normi mccrocklin of virobnych primer: LTOs 3.3.6.042-99. [Introductio. From 1999-01-12]. K.: Mn. Aharoni health, 1989. 15 p. (Sanitary norms).

#### REFERENCES:

1. S.F. Neves, J.B.L.M. Campos (2022). The impact of water on firefighter protective clothing thermal performance and steam burn occurrence in firefighters. *Fire Safety Journal*. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103506>.
2. Zhang H., Song G., Ren H., Cao J. (2018). The effects of moisture on the thermal protective performance of firefighter protective clothing under medium intensity radiant exposure. *Textile Research Journal*. 88 (8): 847-862. Retrieved from: [10.1177/0040517517690620](https://doi.org/10.1177/0040517517690620).
3. Eman Saad. Treatment of Firefighter's Suit against Fire to Increase Its Effectiveness. Retrieved from: <https://doi.org/10.12816/0045763>.
4. Kostenko V., Kostenko T., Zemlianskiy O., Maiboroda A., Kutsenko S. (2017). Automatization of individual anti-thermal protection of rescuers in the initial period of fire suppression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. No. 5/10 (89). P. 4–11.
5. Gavrylko O.A., Vashkevich R.V. (2023). Scientific basis of creation of methods and means of individual anti-gas-thermal protection of rescuers: monograph; Lviv: Lviv Polytechnic. 387 p.
6. Ozgur Atalay, Senem Kursun Bahadir, Fatma Kalaoglu (2015). An Analysis on the Moisture and Thermal Protective Performance of Firefighter Clothing Based on Different Layer Combinations and Effect of Washing on Heat Protection and Vapour Transfer Performance. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2015/540394>.
7. Aude Morel, Gauthier Bedek, Fabien Salaün & Daniel Dupont (2014). A review of heat transfer phenomena and the impact of moisture on firefighters' clothing and protection, *Ergonomics*, 57:7, 1078–1089. DOI: [10.1080/00140139.2014.907447](https://doi.org/10.1080/00140139.2014.907447).
8. Yun Su, Jun Li & Guowen Song (2017). The effect of moisture content within multilayer protective clothing on protection from radiation and steam. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 24:2, 190–199. Retrieved from: <https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1321890>.
9. Cherychka A. (2019). Vohnestiiki tkanyny z meta-i para-aramidnykh volokon. Z choho shyty suchasnyi kostium pozhezhnyka [Fire-resistant fabrics made of meta- and para-aramid fibers. What to sew a modern firefighter's suit from]. Retrieved from: [teksika.ua/company/news/vognestiyki\\_tkanyny\\_z\\_metai\\_paraaramidnykh\\_volokon\\_z\\_chogo\\_shyty\\_suchasnyy\\_kostyum\\_pozhezhnyka](https://teksika.ua/company/news/vognestiyki_tkanyny_z_metai_paraaramidnykh_volokon_z_chogo_shyty_suchasnyy_kostyum_pozhezhnyka) [in Ukrainian].
10. Abu Shaid, Lijing Wang, Rajiv Padhye, Martin Gregory (2019). Low cost bench scale apparatus for measuring the thermal resistance of multilayered textile fabric against radiative and contact heat transfer. *Hardware X*. Vol. 5. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00060>.
11. Safety of life activities. Workshop (n.d.). Retrieved from: [files.khadi.kharkov.ua](https://files.khadi.kharkov.ua).

12. Henning, A. (2022). The Heat reducing Effects of Reflective Clothing in Firefighting: A study on the efficiency of reflective textiles in personal protective equipment (Dissertation). Retrieved from: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-92455>.

13. Kostenko T.V. (2018). Rozvytok naukovykh osnov pidvyshchennia bezpeky riaduvanykh pid chas vedennia operatyvnykh dii v umovakh nahrivnoho mikroklimatu [Development of the scientific basis of improving the safety of rescuers during operational actions in the conditions of a heated microclimate]. Author's ref. diss. dokt. of science., DVNZ DonNTU, Pokrovsk. 40 p. [in Ukrainian]

14. Research Gate (n.d.) Materials of the XIII International Scientific and Practical. Retrieved from: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net).

15. Sinat-Radchenko D., Ivashchenko N., Vasilenko S. (2016). Teploviddacha za vilnym rukhom povitria u velykomu obiemi [Heat transfer due to free movement of air in a large volume]. *Sugar of Ukraine*, no. 6–7 (126–127), pp. 34–35. [in Ukrainian]

16. Improving the protective properties of special clothing for the State Emergency Service workers for working in high-temperature conditions. Code "Protective clothing". Lviv, 2017. P. 29.

17. Santen normi mccrocklin of virobnychih primer: LTOs 3.3.6.042-99. [Introductio. From 1999-01-12]. K.: Mn. Aharoni health, 1989. 15 p. (Sanitary norms).

## НОТАТКИ

Наукове видання

# НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКИ

Серія: Технічні науки

№ 1, 2024

Коректура • Ірина Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Андрій Філатов

Підписано до друку 22.03.2024 р.  
Формат 60x84/8. Гарнітура Arimo. Папір офсет. Цифровий друк.  
Ум. друк. арк. 14,65. Замов. № 0724/476. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»  
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 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.